

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERALTINDA KÖMÜR GAZLAŞTIRMA İÇİN TEORİK MODEL
GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR İLE SONUÇLARIN
YORUMLANMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet YILDIZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Akışkan Programı

EYLÜL 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERALTINDA KÖMÜR GAZLAŞTIRMA İÇİN TEORİK MODEL
GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR İLE SONUÇLARIN
YORUMLANMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet YILDIZ
(503121135)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mesut GÜR

EYLÜL 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121135 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ahmet YILDIZ** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**YERALTINDA KÖMÜR GAZLAŞTIRMA İÇİN TEORİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR İLE SONUÇLARIN YORUMLANMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mesut GÜR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Nurdil ESKİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....
Prof. Dr. Hasan Rıza GÜVEN
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **2 Eylül 2015**
Savunma Tarihi : **1 Ekim 2015**

Aileme ve dostlarıma,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması, TÜBİTAK tarafından desteklenen “Ülkemiz kömürleri için yeraltında kömür gazlaştırma teknolojisinin geliştirilmesi” başlıklı proje dâhilinde hazırlanmıştır (Proje No: 3527682465).

Öncelikle bana bu projede çalışma imkânı veren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mesut Gür’e ve tezimin her noktasında değerli görüş ve önerileriyle bana yol gösteren Prof. Dr. Nurdil Eskin’e teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca süreç boyunca bana destek olan proje arkadaşlarım ve dostlarım Mak. Müh. Ünal Altıntaş’a ve Mak. Yük. Müh. Oğuz Büyükkşirin’e teşekkür ederim. Onlar olmadan bu çalışmayı tamamlamam mümkün olmazdı.

Eylül 2015

Ahmet Yıldız
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Yeraltında Kömür Gazlaştırma Tekniği	2
1.2.1 Yeraltında kömür gazlaştırmanın kısa tarihi	2
1.2.2 Yeraltında kömür gazlaştırma işleminin kimyası	3
1.2.3 Yeraltında kömür gazlaştırmaya uygun kömür yataklarının özellikleri	6
1.2.4 Kuyular arası bağlantı yöntemleri	7
1.3 Literatür Araştırması	9
1.3.1 Saha deneyleri	9
1.3.2 Laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar	11
1.3.3 Modelleme çalışmaları	18
2. KÖMÜR GAZLAŞTIRMA MATEMATİK MODELİ	23
2.1 Matematik Modelin Kurgusunda Yapılan Kabuller	23
2.2 Gaz Fazı İçin Korunum Denklemleri	24
2.2.1 Kütlenin korunumu	24
2.2.2 Bileşenlerin molar korunumu.....	24
2.2.3 Enerji korunumu	25
2.3 Katı Fazı için Korunum Denklemleri	26
2.3.1 Kütle korunumu	26
2.3.2 Enerji korunumu	26
2.4 Kimyasal Tepkimeler	28
2.5 Diğer Yardımcı Denklemler	32
2.5.1 İdeal gaz yasası	32
2.5.2 Oyuk yarıçapı hesabı.....	32
2.6 Sayısal Çözüm.....	34
2.6.1 Ayrıklaştırma tekniği	34
2.6.2 Sayısal çözüm yöntemi	38
2.6.3 Çözüm algoritması	41
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	43
3.1 Laboratuvar Ölçekli Yeraltı Kömür Gazlaştırma Deney Düzeneği	43
3.1.1 Tasarım kriterleri.....	43
3.1.2 Deney düzeneği ekipmanları.....	45
3.1.2.1 Gaz besleme düzeneği.....	45
3.1.2.2 Reaktörler.....	47
3.1.2.3 Döngülü toz tutucu (Siklon).....	49
3.1.2.4 Soğutucu.....	51
3.1.2.5 Yıkama kolonu (Dolgu yaşı filtre)	52
3.1.2.6 Vakum pompası	53
3.1.2.7 Gaz kromatografi örnek alma hattı	54

3.1.2.8 Yakıcı (Flare)	55
3.1.3 Ölçme sistemleri.....	55
3.1.3.1 Sıcaklık ölçümü.....	56
3.1.3.2 Basınç ölçümü	58
3.1.3.3 Debi ölçümü	59
3.1.3.4 Gaz kromatografi.....	64
3.1.3.5 SCADA sistemi	66
3.2 Deney Plan ve Programı	67
3.2.1 Deney düzeneğinin hazırlanması	68
3.2.2 Deneyin yapılışı.....	69
4. DENEY SONUÇLARI.....	73
4.1 Birinci Gazlaştırma Deneyinin Sonuçları.....	74
4.2 İkinci Gazlaştırma Deneyinin Sonuçları	80
4.3 Üçüncü Gazlaştırma Deneyinin Sonuçları	85
5. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....	91
5.1 Deney Sonuçları ile Literatür Çalışmalarının Karşılaştırılması	91
5.2 Deney Sonuçları ile Teorik Model Sonuçlarının Karşılaştırılması	93
5.3 Literatür Çalışmaları ile Teorik Model Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	96
6. MATEMATİK MODEL İLE PARAMETRE ÇALIŞMALARI	99
6.1 Oksijen ile Gazlaştırma Analizleri	100
6.2 Oksijen ve Su Buharı Karışımı ile Yapılan Analizler	107
6.3 Gazlaştırma Debisi Etkisi	113
6.4 Kömür Tutuşturma Enerjisi / Sıcaklık Etkisi	120
6.5 Gazlaştırma Kanalı Büyüklüğünün Etkisi	122
6.6 Isı Taşınım Faktörünün Etkisi	124
6.7 Gaz Nüfuz Derinliği Parametresinin Etkisi	127
7. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER	131
KAYNAKLAR.....	133
EKLER.....	139
ÖZGEÇMİŞ	145

KISALTMALAR

BET	: Brunauer-Emmett-Teller
CRIP	: Kontrollü Tepkime Besleme Noktası
GC	: Gaz Kromatografi
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IGCC	: Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrimi
LLNL	: Lawrence Livermore National Laboratory
LVW	: Bağlantılı Düşey Kuyular
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
TDMA	: Üçlü Bant Matris Algoritması
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
YKG	: Yeraltında Kömür Gazlaştırma

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : YKG ile ilgili gerçekleştirilen metamatik modelleme çalışmaları.	21
Çizelge 2.1 : Yeraltı gazlaştırma işleminin temel tepkimeleri ve kullanılan Arrhenius parametreleri ($\beta_j=0$).	29
Çizelge 3.1 : Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm aletleri.	56
Çizelge 3.2 : Kullanılan farklı tip ölçüm aletlerinin kapasiteleri.	57
Çizelge 3.3 : Deney tesisatı üzerindeki ısıtıcıların konum ve ölçüm aralıkları.	57
Çizelge 3.4 : Deney hattı üzerinde kullanılan sıcaklık ölçerlerin yerleri ve kullanım amaçları.	58
Çizelge 3.5 : Deney tesisatı üzerindeki basınç ölçerlerin konum ve ölçüm aralıkları.	59
Çizelge 3.6 : Kullanılan orifis halkalarının dar boğaz çapları.	63
Çizelge 3.7 : Debi ölçerlerin konum ve ölçüm aralıkları (düşük debi).	63
Çizelge 3.8 : Debi ölçerlerin konum ve ölçüm aralıkları (yüksek debi).	64
Çizelge 3.9 : Kullanılan referans gazın bileşimi (molar oran).	65
Çizelge 3.10: Ölçüm cihazlarının SCADA sistemine bağlı oldukları dijital adresler.	67
Çizelge 4.1 : Malkara kömür numunesinin kısa analiz sonuçları [65].	73
Çizelge 4.2 : Malkara kömür numunesinin elementer analiz sonuçları [65].	73
Çizelge 5.1 : Deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması.	91
Çizelge 5.2 : Deneylerde kullanılan kömürlerin karşılaştırılması [41][65].	92
Çizelge 6.1 : Matematiksel modelde kullanılan referans analiz parametreleri.	99
Çizelge 6.2 : Matematik model kullanılarak yapılacak karşılaştırma parametreleri.	100
Çizelge 6.3 : Sayısal çözümde kullanılan ayırıklaştırma parametreleri.	100

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: Bir IGCC tesisinin şematik görünümü [1].	1
Şekil 1.2	: YKG sürecinde kömür yatağının farklı bölümleri ile burada gerçekleşen olaylar [8].	5
Şekil 1.3	: Sıcaklık ve basıncın yapay gaz bileşimine etkisi [10].	6
Şekil 1.4	: YKG’da ileri ve geri yanma tekniklerinin şematik görünümü. a) Geri yanma. b) İleri yanma [8].	8
Şekil 1.5	: CRIP tekniğinin şematik gösterimi [20].	9
Şekil 1.6	: Glaser ve Johnson tarafından kullanılan deney düzeneği [38].	12
Şekil 1.7	: Liu v.d tarafından yapılan çalışma sonucu buhar-oksijen oranının yanıcı gaz oluşumuna etkisi [39].	13
Şekil 1.8	: Daggupati v.d tarafından yapılan çalışmalar sonucu tahmin edilen oyuk geometrisi [40].	14
Şekil 1.9	: Stanczyk v.d tarafından kullanılan reaktör [41].	15
Şekil 1.10	: Çift aşamalı gazlaştırma sürecinde, aşamalar arası sürenin oksijen derişimine bağlı değışimi [43].	17
Şekil 2.1	: Silindir blok içerisinde bir kontrol hacmi.	23
Şekil 2.2	: Gazlaştırma kanalında yarıçap artışı.	33
Şekil 2.3	: Sonlu hacimler yöntemine göre kontrol hacmi.	35
Şekil 2.4	: Satır-Satır yönteminin uygulanışı.	39
Şekil 2.5	: Sayısal çözüm algoritması.	42
Şekil 3.1	: Deney düzeneği elemanlarının şematik görünümü.	44
Şekil 3.2	: Üfleç, buharlaştırıcı ve oksijen ile azot tüplerinin bulunduğu besleme düzeneği.	46
Şekil 3.3	: Oksijen regülatöründen sonra debiyi kontrol etme amaçlı eklenen iğne vana.	47
Şekil 3.4	: Büyük reaktör.	48
Şekil 3.5	: Büyük reaktörün kesit görünümü ve ısılıft noktaları.	48
Şekil 3.6	: a) Küçük reaktörün yandan görüntüsü, b) Küçük reaktörün kesit görünümü ve ısılıft noktaları	49
Şekil 3.7	: Siklon ve arkasında soğutucunun montaj halinde görünümü.	50
Şekil 3.8	: Siklonun biriktirme tankına eklenen boşaltma vanası.	51
Şekil 3.9	: a) Biriktirme tankı. b) Soğutucudan biriktirme tankına ilave bağlantı.	52
Şekil 3.10	: Yıkama kolonu.	53
Şekil 3.11	: a) Su tankı çıkışında yakıcı ve GC hatlarının ayrılması. b) GC öncesi tahliye hattı.	55
Şekil 3.12	: Orifisin çalışma prensibi.	60
Şekil 3.13	: Gaz Kromatografi Cihazı.	64
Şekil 3.14	: Örnek bir gaz kromatografi sonucu.	65
Şekil 4.1	: Deneyde kullanılan kömür bloğunun reaktör içerisinde görünümü.	74
Şekil 4.2	: Reaktör içerisinde sıcaklık ölçüm noktaları.	75
Şekil 4.3	: Deney boyunca oksijen besleme debisinin zamanla değışimi.	75
Şekil 4.4	: Gazlaştırma kanalı içerisinde zamana bağlı sıcaklık değışimi.	76
Şekil 4.5	: Kömür içerisinde zamana bağlı sıcaklık değışimi.	77
Şekil 4.6	: Reaktör çıkışında gaz sıcaklığı.	77
Şekil 4.7	: Yakıcıda ölçülen sıcaklık.	78
Şekil 4.8	: Gaz kromatografi kullanılarak elde edilen yapay gaz bileşimleri.	79

Şekil 4.9 : Deney sonucu oluşan oyuğun görüntüsü.	79
Şekil 4.10: a) Deneyde kullanılan kömür bloğu. b) Kömür ile doldurulan reaktör. ..	80
Şekil 4.11: Reaktör içerisinde sıcaklık ölçüm noktaları.	81
Şekil 4.12: Deneyde kullanılan gazlaştırıcı besleme debileri.	81
Şekil 4.13: Gazlaştırma kanalı boyunca sıcaklık ölçümleri.	82
Şekil 4.14: Yapay gaz bileşiminin zamana göre değişimi.	83
Şekil 4.15: Reaktör çıkışında ve yakıcıda sıcaklık dağılımı.	84
Şekil 4.16: a) Deneyde kullanılan kömür bloğu. b) Reaktörün kömür ile doldurulması.	85
Şekil 4.17: Reaktör içerisinde sıcaklık ölçümü alınan noktalar.	86
Şekil 4.18: Deneyde kullanılan gazlaştırıcı besleme debileri.	87
Şekil 4.19: Gazlaştırma kanalı ve reaktör çıkışında sıcaklık dağılımı.	87
Şekil 4.20: Kömür bloğu içerisinde sıcaklık dağılımı.	88
Şekil 4.21: Reaktör çıkışında ve yakıcıda sıcaklık dağılımı.	89
Şekil 4.22: Gaz kromatografi ölçümlerine göre yapay gaz bileşiminin değişimi.	89
Şekil 5.1 : Matematik model çalışmaları sonucu elde edilen kömür içerisindeki sıcaklıklarının 3 no'lu deney sonuçları ile karşılaştırılması.	94
Şekil 5.2 : Matematik modelleme sonucu elde edilen yapay gaz bileşimlerinin 3 no'lu deney sonuçları ile karşılaştırılması.	95
Şekil 5.3 : Stanczyk v.d. (2010) tarafından yapılan deney sonuçları ile matematik model sonuçlarının karşılaştırılması [41].	96
Şekil 5.4 : Stanczyk v.d (2011) tarafından yapılan deney sonuçları ile matematik model sonuçlarının karşılaştırılması [42].	98
Şekil 6.1 : Kanal içerisinde sıcaklıkların zamana bağlı değişimi ($Q=2.5\text{ m}^3/\text{h}$).	101
Şekil 6.2 : Kanalın 5 cm üzerinde sıcaklıkların zaman bağlı değişimi ($Q=2,5\text{ m}^3/\text{h}$).	102
Şekil 6.3 : 1 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları ($Q=2,5\text{ m}^3/\text{h}$).	102
Şekil 6.4 : 3 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları ($Q=2,5\text{ m}^3/\text{h}$).	103
Şekil 6.5 : 5 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları ($Q=2,5\text{ m}^3/\text{h}$).	103
Şekil 6.6 : Elde edilen yapay gaz bileşiminin zamana bağlı değişimi ($Q=2,5\text{ m}^3/\text{h}$).	104
Şekil 6.7 : Oksijen oranının kanal boyunca değişimi ($Q=2,5\text{ m}^3/\text{h}$).	105
Şekil 6.8 : Karbondioksit oranının kanal boyunca değişimi ($Q=2,5\text{ m}^3/\text{h}$).	105
Şekil 6.9 : Karbonmonoksit oranının kanal boyunca değişimi ($Q=2,5\text{ m}^3/\text{h}$).	106
Şekil 6.10: Bileşenlerin 1 saat sonunda kanal boyunca değişimi ($Q=2,5\text{ m}^3/\text{h}$).	106
Şekil 6.11: Kömür bloğu içerisindeki oyuğun zamanla gelişimi ($Q=2,5\text{ m}^3/\text{h}$).	107
Şekil 6.12: Kanal içerisinde sıcaklıkların zamana bağlı değişimi (Buharlı).	108
Şekil 6.13: Saf oksijen beslemeli ve oksijenin yanında %10 su buharı beslemeli durumlarda kömür içi sıcaklıklarının karşılaştırılması.	108
Şekil 6.14: 1 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları (Buharlı).	109
Şekil 6.15: 3 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları (Buharlı).	110
Şekil 6.16: 5 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları (Buharlı).	110
Şekil 6.17: Elde edilen yapay gaz bileşiminin zamana bağlı değişimi (Buharlı). ...	111
Şekil 6.18: Bileşenlerin 1 saat sonunda kanal boyunca değişimi (Buharlı).	112

Şekil 6.19: Saf oksijenli durumda ve buhar beslemeli durumda kömür bloğu içerisindeki oyuğun zamanla gelişimi.	113
Şekil 6.20: Kanal içerisinde sıcaklıkların zamana bağlı değişimi ($Q=1,5 \text{ m}^3/\text{h}$).....	113
Şekil 6.21: Gazlaştırma debisinin gaz sıcaklığı dağılımına etkisi.	114
Şekil 6.22: Farklı debilerde kanalın 5 cm üzerinde sıcaklıkların zaman bağlı değişimi.	115
Şekil 6.23: Gazlaştırma debisinin oyuk gelişimine etkisi.....	116
Şekil 6.24: Oksijen oranının kanal boyunca değişimi ($Q=1,5 \text{ m}^3/\text{h}$).....	117
Şekil 6.25: Karbondioksit oranının kanal boyunca değişimi ($Q=1,5 \text{ m}^3/\text{h}$).	117
Şekil 6.26: Karbonmonoksit oranının kanal boyunca değişimi ($Q=1,5 \text{ m}^3/\text{h}$).	117
Şekil 6.27: Besleme debisinin bileşenlerin kanal boyunca değişimi üzerinde etkisi.	118
Şekil 6.28: Gazlaştırma debisinin yapay gaz karışımına etkisi.	119
Şekil 6.29: Tutuşturma sıcaklığının yapay gaz bileşimi üzerinde etkisi.	120
Şekil 6.30: Tutuşturma sıcaklığının oyuk gelişimine etkisi.....	121
Şekil 6.31: Tutuşturma sıcaklığının gaz sıcaklığına etkisi.	122
Şekil 6.32: Başlangıç kanal boyutunun oyuk gelişimine etkisi.	123
Şekil 6.33: Başlangıç kanal boyutunun gaz sıcaklığı üzerinde etkisi.....	123
Şekil 6.34: Başlangıç kanal boyutunun yapay gaz bileşimi üzerinde etkisi.	124
Şekil 6.35: Isı taşınım faktörünün gaz sıcaklığı üzerinde etkisi.	125
Şekil 6.36: Isı taşınım faktörünün yapay gaz bileşimi üzerinde etkisi.	126
Şekil 6.37: Isı taşınım faktörünün oyuk gelişimi üzerinde etkisi.	126
Şekil 6.38: Gaz nüfuz derinliğinin yapay gaz bileşimi üzerinde etkisi.	127
Şekil 6.39: Gaz nüfuz derinliğinin gaz sıcaklığı üzerinde etkisi.	128
Şekil 6.40: Gaz nüfuz derinliğinin oyuk gelişimine etkisi.	129
Şekil A.1 : Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası, sayfa 1/3.....	140
Şekil A.2 : Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası, sayfa 2/3.....	141
Şekil A.3 : Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası, sayfa 3/3.....	142

YERALTINDA KÖMÜR GAZLAŞTIRMA İÇİN TEORİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR İLE SONUÇLARIN YORUMLANMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Yeraltında Kömür Gazlaştırma, düşük kaliteli ve geleneksel madencilik yöntemleri kullanılarak çıkarılması ekonomik olmayan kömür yataklarından yanıcı gaz elde edilmesini hedefleyen bir yöntemdir. Bu yöntemde kömür damarına sondaj ile iki kuyu açılır ve üretim kuyusundan gazlaştırma ajanı olarak hava, saf oksijen ve su buharı kontrollü bir şekilde gönderilerek yanıcı yapay gaz elde edilmesi sağlanır. Yapay gazın içeriği çoğunlukla CO_2 , CO , H_2 ve CH_4 'ten oluşmaktadır.

Yeraltında kömür gazlaştırma, tahmini ve kontrolü güç bir süreçtir. Sürecin anlaşılabilmesi için pilot denemeler ve saha deneyleri yapmak ise oldukça pahalıdır. Bu nedenle sürecin laboratuvar ölçekli deney tesisatları kullanılarak benzetiminin yapılması, YKG sürecini etkileyen parametrelerin ve en uygun çalışma şartlarının bulunması için önemli bir yöntemdir. Bunun yanında, YKG sürecinin matematik modelinin kurulması, süreç hakkında deneysel çalışmalar ile alınması güç verilerin edinilmesine, farklı işletme parametrelerinin etkisinin hızlı bir şekilde incelenebilmesine ve gerçek uygulamaların önceden benzetiminin yapılabilmesine olanak sağlayacaktır. Yapılan bu çalışmada YKG sürecinin hem matematiksel modellemesi, hem de süreçle ilgili deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Deney düzeneği, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Yanma Laboratuvarlarında kurulmuştur. Düzenek, yalıtımlı ve üzerinde 20 adet sıcaklık ölçüm noktası bulunduran bir reaktörden ve elde edilen yapay gazın temizlenebilmesi için toz tutucu, soğutucu ve yıkama kolonunda oluşan bir tesisattan oluşmaktadır. Elde edilen gazın zararsız bir şekilde imha edilebilmesi için tesisatın sonunda bir adet yakıcı bulunmaktadır. Reaktör içerisinden alınan sıcaklık ölçümlerinin yanı sıra deney tesisatı üzerinde çeşitli noktalardan da sıcaklık ve basınç ölçümleri alınarak süreç kontrol edilmektedir. Ayrıca gazlaştırma ajanlarının ve üretilen yapay gazın debisini ölçmek için orifisler kullanılmıştır. Yapay gazın bileşimi, gaz kromatografi cihazı ile belirlenmektedir.

Çalışma boyunca üç adet başarılı deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Malkara, Pirinççesme yöresinden çıkarılan linyit kullanılmıştır ve temel gazlaştırma ajanı olarak saf oksijen beslemesi yapılmıştır. Yapılan ilk deney toplamda 14 saat sürmüştür. Deney boyunca elde edilen yapay gazın içeriği ise ortalama olarak %30 CO , %25 H_2 ve %3 CH_4 'ten oluşmaktadır. İkinci deneyin ise 3 bölümden oluştuğu söylenebilir. İlk bölüm yalnızca oksijen kullanılarak yapılan gazlaştırma sürecidir. Burada elde edilen gazın ortalama içeriği %40 CO , %20 H_2 ve %3 CH_4 olarak belirlenmiştir. Bu bölümün son bir saatinde yapay gazın kalitesinde düşüş yaşanmıştır. Deney daha sonra hava/oksijen karışımı ile devam etmiştir. Bu bölümde ise yapay gazın içeriğinde neredeyse hiç yanıcı bileşen bulunmamaktadır. Deneyin üçüncü bölümünde hava beslemesi kesilmiş ve oksijenin yanında su buharı beslemesi de yapılmıştır. Böylece yapay gazın bileşimi %30 CO ve %25 H_2 barındıracak şekilde artmış, fakat bu noktadan sonra gazlaştırma sürdürülemediği ve deney sonlandırılmıştır. Üçüncü ve sonra deneme ise iki kısımdan oluşmaktadır ve deney 14 saat sürmüştür. İlk kısımda gazlaştırma ajanı olarak saf oksijen kullanılmıştır ve %30 CO , %15 H_2 , %3 CH_4 içeriğinde yapay gaz elde edilmiştir. Deney esnasında yapay gaz kalitesinin düştüğü

belirlendiğinde sisteme su buharı beslemesi yapılmıştır. Bu besleme sonunda yapay gazın içeriği %35 CO ve %20 H₂ barındıracak şekilde değişmiştir. Bu işlem göstermiştir ki, su buharı beslemesi elde edilen yapay gazın kalitesini arttırmaktadır.

YKG sürecinin sayısal benzetimi için kurulan modelde kömür bloğu iki boyutlu aksisimetrik olarak ele alınmıştır. Gazlaştırma kanalı içerisindeki gaz akışı ise eksenel yönde tek boyutlu olarak düşünülmüştür. Tepkimeler, Arrhenius tipi kimyasal kinetik denklemleri kullanılarak hesaba katılmışlardır. Bu çerçeveler içerisinde süreklilik, kimyasal bileşenlerin kütle korunum denklemi ve enerji korunum denklemleri yazılmış, yazılan bu denklemler sonlu hacimler yöntemine göre ayrıklaştırılmıştır. Açığa çıkan lineer olmayan denklem takımları iteratif yöntemler kullanılarak çözülmüştür.

Kurgulanan matematik model kullanılarak YKG süreci için önem arz eden gazlaştırıcı bileşimi, besleme debisi ve kömür bloğunun ilk sıcaklığı gibi birkaç parametre değiştirilerek bu parametrelerin sürece etkileri tartışılmıştır. Ayrıca kurulan modele özel ısı taşınım faktörü ve gaz nüfuz derinliği gibi bazı parametrelerin sonuçlara etkisi de gösterilmiştir. Matematik modelleme sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırıldığında ise kurgulanan matematik modelin gazlaştırma sürecinde yaşanan kuruma ve piroliz süreçlerini kapsamıyor olmasında dolayı yaşanan sapmalar tespit edilmiştir. Bunun yanında matematik modelin oyuk gelişimini ve kömür bloğu içerisindeki sıcaklık dağılım karakterini doğru tahmin etmiş olduğu görülmektedir.

Son olarak, deneysel çalışma ve literatürden elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında genel yönelimin doğru olduğu, ölçülen değerlerde gözlemlenen farklılıkların ise gazlaştırma için kullanılan kömür özelliklerinin farklı olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL & EXPERIMENTAL WORK AND COMMENTS ON THE RESULTS FOR THE UNDERGROUND COAL GASIFICATION PROCESS

SUMMARY

Underground Coal Gasification (UCG) is a method, which aims to produce flammable gas (syngas) from low quality or economically non-feasible coal seams if they were to be mined using conventional methods. This is achieved by drilling two wells into the coal seam and then these wells are linked to each other using various techniques. One of the wells is named the injection well, while the other one is named the production well. For the process to start, a combustion is initiated in-situ to increase the temperature of the coal seam first. After the temperature levels are elevated to optimal gasification conditions, injection of gasification agents starts. These agents are generally air, pure oxygen and for hydrogen oriented gasification, steam. Resulting syngas from the gasification mainly consists of CO_2 , CO , H_2 and CH_4 . If air is used as the gasification agent, a high amount of N_2 is inevitably found in the composition of the syngas, thus it yields a syngas with much lower heating values opposed to the gasification using pure oxygen.

As the gasification progresses, a cavity forms. The shape and the expansion of this cavity is an important aspect of the UCG process. Its growth should be able to be controlled and guessed beforehand. Due to the high temperatures and forming of the cavity, roof of the coal seam may collapse and cave-ins might occur. UCG processes can work at high pressure levels because of the hydrostatic pressure in the coal seam. The pressure in the cavity should be controlled. In the likely event of the cavity pressure being higher than the hydrostatic pressure around the seam, the production gasses would leak from the coal seam and would cause pollution such as underground water pollution.

All things considered, it is obvious that the UCG process is hard to predict and control. Also as the pilot scale and on-site experiments are expensive, it becomes important to conduct laboratory scale ex-situ gasification experiments, which simulate the underground conditions to find more about the UCG process and to find optimal working conditions. It is also important to mathematically model the UCG process so that the effects of changing different parameters can be easily observed and assessed.

This work's aim is to setup a laboratory scale UCG experimental setup, to conduct gasification experiments and to develop a mathematical model to numerically simulate the UCG process.

For this purpose, an experimental setup was built in the Combustion Laboratories of the Istanbul Technical University Mechanical Engineering Faculty. The experimental apparatus consists of a reactor in which the gasification will occur, a cyclone to remove solid particles such as ash from the syngas, a heat exchanger to cool down the syngas and condense the water and tar in the syngas, a scrubber in order to remove the H_2S from the syngas, a vacuum pump to overcome pressure losses in the experimental setup and a flare to burn the resulting syngas in order to safely remove the product. Reactor is designed to allow different well configurations, contains twenty temperature measurement points and is highly insulated in order to correctly simulate the underground conditions.

Pressure measurements are taken along the experimental setup using transducers to keep track of the pressure levels and the pressure losses. Temperature measurements inside the reactor are taken using several specially coated thermocouple which are able to stand the elevated temperatures which are achieved during the process. Additionally, much like the pressure, temperature along the experimental setup. There is also one thermocouple located at the flare to check the pilot flame. Four orifices are used to measure the flow rate of air, oxygen, steam and syngas. Gas samples are gathered after the syngas passed from the scrubber to get its composition determined. Composition of the syngas is measured using a Gas Chromatogram.

Three successful experiments are conducted using the lignite coal gathered from the Pirinççeşme, Malkara. For the main gasification agent, pure oxygen is used for all three experiments. First experiment last for 14 hours and in average produced syngas had 30% CO, 25% H₂ and 3% CH₄ in its composition.

The second experiment consists of three phases. Gasification agent used in the first phase is pure oxygen. For the second phase, oxygen enriched air is used for gasification and for the last phase air feed is stopped and steam is fed into the reactor together with oxygen. For most part of the phase one, a syngas composition with 40% CO, 20% H₂ and 3% of CH₄ is achieved. These values started to drop during the last hours of the phase one. During the second phase composition of the syngas was devoid of any burnable component. After the steam injection started with the third phase, the CO composition slowly increased to 30% while H₂ composition increased to 25%. This regime, however, could not be sustained and the experiment terminated.

The third and final experiment last for 14 hours. For the gasification agent pure oxygen is fed with a rate of 1.5 m³/h. This experiment consists of two phases in which for the second phase, an additional steam feed is used. For the first half of the experiment, CO levels was around 30% average while the average hydrogen level was about 15%. After the steam phase begun, the CO concentration increased to 35% and the H₂ concentration increased to 20%. It shows that steam injection increases the overall quality of the syngas.

Mathematical model developed in this work treats the coal seam as a cylinder and assumes the gasification channel is on the axis of this cylinder. Using this view, it is possible to model the UCG process in 2D axisymmetric coordinates. Another assumption is made for the gasification channel to be treated one-dimensional. Continuity, conservation of mass for chemical species and conservation of energy equations are written for this system. The reactions are taken into account using Arrhenius type chemical kinetics. The resulting non-linear equation system is discretized using Finite Volume Approach. Resulting system of algebraic equation systems are solved iteratively using appropriate numerical methods.

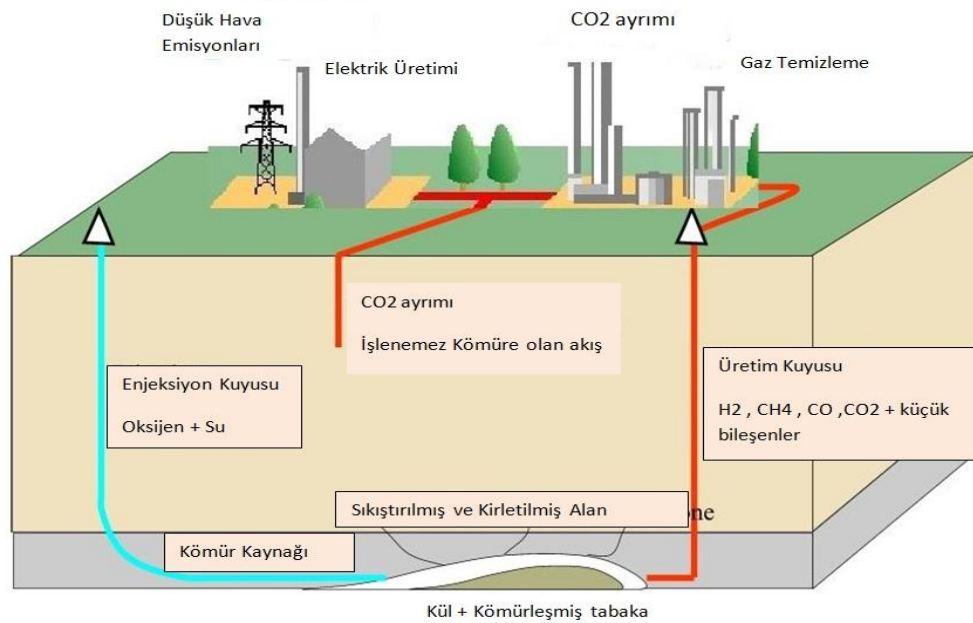
Using the mathematical model developed in this work, it is possible to change the working parameters and discuss about their impact on the UCG process. Some of these parameters include the geometry of the coal block, flow rate and composition of the gasification agents, initial radius of the gasification channel and initial temperature of the coal block. Additionally, there are some model specific parameters such as heat transfer factor and the gas penetration depth. Although these parameters are not directly linked any physical property, one may loosely relate the heat transfer factor to the effect of turbulence on the heat transfer, and the gas penetration depth to the porosity of the coal. In this work, effects of these parameters are also discussed briefly.

Lastly, experimental work, modelling results and the work done in literature is compared with each other. Comparing the experimental results of other works to the experimental results of this work, some variations are spotted relating to the syngas composition. These variations are addressed by making note of the different coal properties used in the experiments.

Comparing the mathematical model results with the experiments, it is found that the model is able to predict some tendencies of the temperature field. Comparing the syngas compositions, it can be said that the model poorly predicted the experimental data. These inconsistencies are explained by the lack of drying and pyrolysis mechanism from the mathematical model. On the other hand, mathematical model was able to predict the cavity shape.

1. GİRİŞ

Yeraltında Kömür Gazlaştırma (YKG) işlemi, kömürün yatağından çıkarılmadan hava, oksijen, su buharı gibi gazlaştırma ajanları kullanılarak yanıcı gaz elde edilmesinde kullanılmasıdır [1]. Bu yöntem, geleneksel kömür madenciliği ile çıkarılması güç/ekonomik olmayan kömür damarlarından faydalanılmasına olanak sağlamaktadır. Elde edilen gaz çoğunlukla hidrojen, karbonmonoksit, karbondioksit ve metandan oluşmaktadır. Gazlaştırma ajanı olarak hava kullanılması halinde yapay gazın büyük çoğunluğu azot gazından oluşmaktadır. Üretilen yapay gaz kuyulardan alındıktan sonra kurulu tesislerde doğaya zararlı maddelerden (örneğin H_2S) arındırılabilir ve/veya içerisinde bulunan karbondioksit tutulabilir. Bu yönüyle YKG, temiz enerji yöntemlerinden birisi olarak tanımlanmaktadır [2]. Elde edilen yapay gazın en önemli kullanım alanı, Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrimi (IGCC) tesislerinde elektrik üretimi için kullanılmasıdır. Böyle bir tesisin şematik görünümü Şekil 1.1’de verilmiştir. Yapay gaz yalnızca yakıt olarak değil, sıvılaştırma, metanol ve amonyak üretimi vb. çeşitli kimyasal işlemde de kullanılabilir [3].



Şekil 1.1: Bir IGCC tesisinin şematik görünümü [1].

1.1 Tezin Amacı

Türkiye, enerji üretiminin büyük bir miktarını ithal kaynaklardan sağlamaktadır [4]. Enerjide dışa bağımlılığın azaltılması ve günümüzün artan enerji ihtiyacı karşısında alternatif enerji kaynakları oluşturması yönünden, ülkenin zengin linyit rezervleri de göz önüne alındığında YKG teknolojisinin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Söz konusu çalışma, YKG teknolojisinin Türkiye linyitlerine uygulanabilirliğini araştıran ve bu teknolojinin üretilmesini ve geliştirilmesini hedef alan 113MO38 numaralı TUBİTAK projesi kapsamında hazırlanmıştır. Yapılan bu çalışmada, YKG sürecinin laboratuvar ortamında benzetiminin yapılmasına olanak sağlayacak bir deney düzeneği kurulması amaçlanmaktadır. Böylece farklı kaynaklardan alınmış kömürler üzerinde yapılacak deneyler ile olası bir YKG uygulamasının başarıya ulaşabilmesi için uygulanması gereken doğru parametrelerin, gerçek ölçekli pilot çalışmalara geçilmeden önce laboratuvar ortamında tespit edilebilmesi sağlanacaktır. Ayrıca bu deneyler, YKG süreci ile ilgili daha derin bir bilgi birikimi oluşmasına sebep olacaktır. Çalışma ayrıca YKG sürecinin matematik modelleme yardımı ile sayısal benzetiminin yapılmasını da kapsamaktadır. Başarılı bir şekilde kurgulanmış matematik model kullanılarak, YKG sürecine etkisi olan parametrelerin, süreci ne şekilde etkilediği ve deney yapılarak elde edilmesi güç olan (reaktör içinde gaz bileşimi vb.) bazı verilerin elde edilebilmesi mümkün olacaktır. Böylece, yapılacak olan deneylerden önce bir öngörü kazanılacaktır. Sonuç olarak çalışmadan elde edilecek verilerin daha büyük kapsamlı deneylere, daha sonra ise saha testlerine ve nihai olarak da tam ölçekli bir YKG tesisinin kurulumuna yol gösterici olması amaçlanmaktadır.

1.2 Yeraltında Kömür Gazlaştırma Tekniği

1.2.1 Yeraltında kömür gazlaştırmanın kısa tarihi

Kömürün yeraltında gazlaştırılması fikri ilk olarak Sir William Siemens tarafından 1868 yılında ortaya atılmıştır [1]. Proses üzerine ilk büyük ve ciddi atılımlar 1930 yılıyla birlikte Sovyetler Birliği'nde gerçekleştirilmeye başlanmış, bu süreç içerisinde birçok işletme tesisi açılmış ve bu konu hakkında araştırmalar yapılmıştır. Sovyetler Birliği'nin dağılması ve Rusya'da çok geniş doğalgaz kaynaklarının bulunması nedeniyle bu bölgede yeraltı gazlaştırma teknolojisinde daha sonraki yıllarda ilerleme kaydedilememiştir.

1970'teki petrol buhranı ülkeleri tekrar farklı kaynak arayışlarına itmiş ve ABD yeraltı kömür gazlaştırma teknolojisini tekrar ön plana almıştır. Amerika'da yapılan en büyük çaptaki YKG testleri 1987-1988 yılları arasında Rocky Mountain'da gerçekleştirilmiştir. Buna rağmen enerji fiyatlarının genel olarak düşmesi bu programı durdurtmuştur [5].

Bunun yanı sıra Avusturalya'nın Chinchilla, Queensland bölgesinde yapılan çalışmalarda 140 metre derilikteki 10 metre kalınlıktaki kömür yatağından saatte 80 bin metreküp yapay gaz üretilmesi sağlanmıştır. Avrupa'da ilk YKG testleri 1980 yıllarında başlamıştır. Belçika'da 1982-84, Fransa'da 1983-84 ve İspanyada 1992-1999 yılları arasında ve en son yıllarda İngiltere'de yapılmıştır [1].

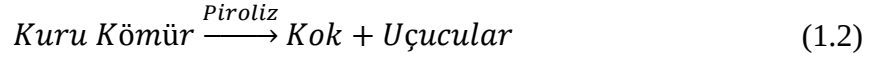
Son yıllarda dünya enerji ihtiyacının hızlı bir şekilde artması ve temiz enerji arayışları, yer altı kömür gazlaştırma teknolojisine olan ilgiyi yeniden canlandırmıştır. Günümüzde Linc Energy, Ergo Energy, Cougar Energy, Carbon Energy gibi şirketler birçok ticari proje geliştirmektedirler. Türkiye'de de yerli kaynakları devreye almak ve enerjide dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla yeraltı kömür gazlaştırma teknolojisi ile ilgili araştırmalar başlatılmıştır ve proje için TKİ ve LLNL arasında Şubat 2011'de sözleşme imzalanmıştır [6,7]. Sözleşme Türkiye linyit rezervlerinin yeraltı kömür gazlaştırması için uygunluğunun araştırılması ve pilot sahaların seçimini kapsamaktadır.

1.2.2 Yeraltında kömür gazlaştırma işleminin kimyası

Kömür gazlaştırma işlemi, kömür içerisinde bulunan karbonun çeşitli tepkimeler yardımı ile yanıcı gaz elde edilmesinde kullanılmasıdır. Bu gazlar karbon temelli karbonmonoksit, metan ve kısmen daha yüksek hidrokarbonlar olabileceği gibi, hidrojen de olabilmektedir. Yanıcı gaz elde edilmesinde ayrıca kömürün pirolizi de çok büyük bir etkidir.

Sağlıklı bir yeraltında kömür gazlaştırma süreci 700°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Buna bağlı olarak kömür, söz konusu olan sıcaklıklara ulaşmadan önce bir takım değişiklikler yaşamaktadır. Bunların ilki, kurumadır. Kömür öncelikle içerisinde bulunan nemin buharlaşmasına bağlı olarak kurumaktadır. Kömür kuruyarak içerisinde bulunan su ayrıldıktan sonra, yüksek sıcaklık ve oksijensiz ortamın etkisi ile pirolize uğrayarak içerisinde bulunan uçucuları kaybetmeye başlar. Piroliz ile açığa çıkan gazın bileşimi genellikle hidrojen,

karbonmonoksit, karbondioksit ve metan gibi hafif moleküller ve az miktarda karmaşık hidrokarbonlardan oluşmaktadır.



Yeraltı kömür gazlaştırma işlemi sırasında gerçekleşen belli başlı tepkimeler ise şunlardır:

Tam Yanma:



Eksik Yanma:



Boudouard Tepkimesi:



Su Buharı ile Gazlaşma:



Metan Oluşumu:



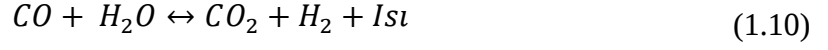
Karbonmonoksit Yanması:



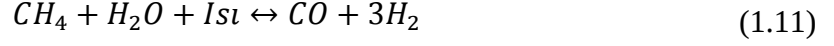
Hidrojen Yanması:



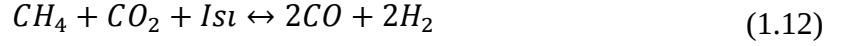
Su-Gaz Değişimi:



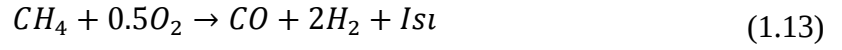
Metanlaşma Tepkimesi:



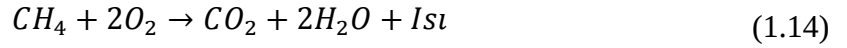
Metanın Karbondioksit ile Reformu:



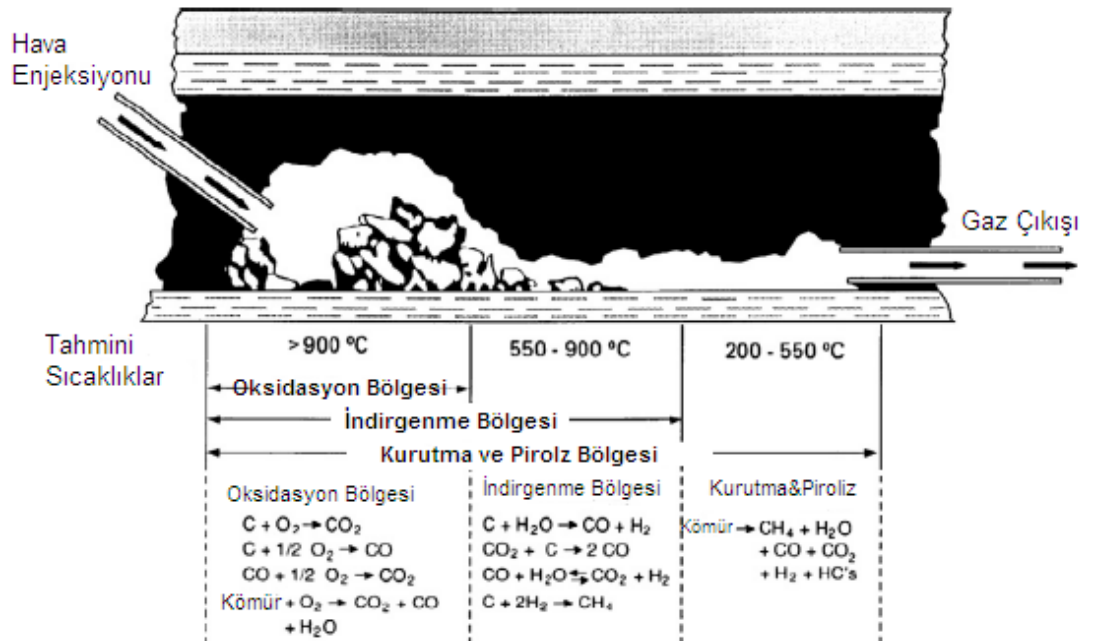
Metan Kısmi Oksitlenme Tepkimesi:



Metan Yanması:



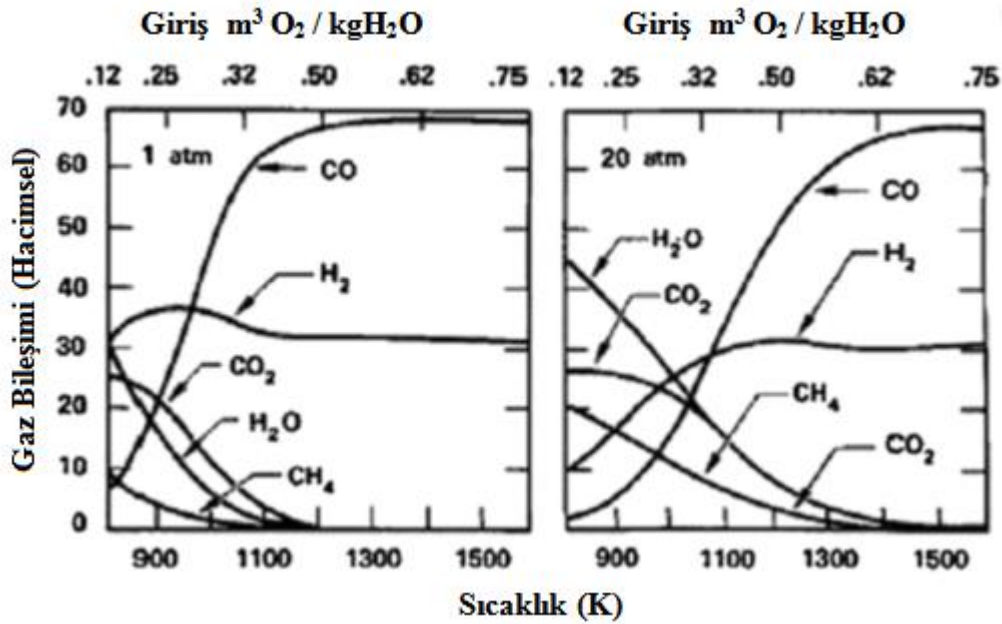
Yukarıda belirtilen tepkimeler, gazlaştırma oyuğu içerisinde farklı noktalarda olmaktadır. Bir YKG sürecinde, damar içerisinde üç farklı bölge bulunduğu bahsedilebilir. Bunlar sırası ile yanma (oksidasyon), indirgenme ve piroliz bölgeleridir. Kanal içerisinde farklı bölgelerin görünümü Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2: YKG sürecinde kömür yatağının farklı bölümleri ile burada gerçekleşen olaylar [8].

Dikkat edileceği gibi, gazlaşma tepkimeleri genellikle endotermik, yani dışarıdan ısı çeken tepkimelerdir. Bu sebeple gazlaşma tepkimelerini beslemek amacı ile yanma tepkimeleri de gazlaştırma sürecinde gerçekleşmek zorundadır. Yeterli yanma sağlanamaz ise, kömür damarı hızla soğuyacak ve gazlaştırma sona erecektir.

YKG sürecinde, basıncın rolü oldukça yüksektir. Atmosferik basınç altında yapılan çalışmalarda elde edilen gazın ısı değeri, kinetik kısıtlamalar nedeni ile düşük olmaktadır. Ayrıca basınç artışı ile yapay gaz bileşimindeki metan oranının arttığı yapılan çalışmalarla bilinmektedir [9]. Sıcaklığın ve basıncın elde edilen yapay gaz bileşimine etkisi Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3: Sıcaklık ve basıncın yapay gaz bileşimine etkisi [10].

1.2.3 Yeraltında kömür gazlaştırmaya uygun kömür yataklarının özellikleri

Yatak seçiminde dikkate alınması gereken ilk konu, kömürün kendisidir. Gazlaştırma işlemi, hem daha yüksek uçucu ve nem miktarına sahip oldukları, hem de tepkimeye girme eğilimleri daha fazla olduğu için linyit ve alt bitümlü kömürlere daha uygundur [11]. Ancak nem seviyesinin %40'ın üzerinde olması durumunda yapay gazın ısı değerinin düştüğü belirtilmektedir [12]. Kömürün kimyasal yapısının dışında, geçirgenliği de YKG işlemine uyumlulukta çok önemli bir etkidir. Yapılan araştırmalar sonucunda kömür geçirgenliğinin 50-150 mD aralığında olmasının, YKG uygulaması için elverişli olduğu söylenmektedir [12].

Kömür damarının özelliklerine bakıldığında ise, damar kalınlığının 1,5 ile 2m arasında olmasının en iyi sonuç verdiği düşünülmektedir [12]. Kömür damar kalınlığı arttıkça

ürün gazının ısı değeri ve geçirgenlik artmakta ve süreç ekonomik açıdan uygun olmaktadır [1,13,14]. Bunun yanında, damar boyunca kalınlık farkının %25'i geçmemesi önerilmektedir.

Yapılan YKG çalışmalarında kullanılan damar derinlikleri 50-1200 m arasında değişkenlik göstermektedir. [14]. Damar derinliği arttıkça kömürün geçirgenliği azalmaktadır. Ayrıca daha derin damarlarda, kuyuların delme maliyeti artmaktadır. Bir araştırmacı ise, litostatik basıncın gaz akışını kısıtlayacağı gerekçesi ile 460m'den derin damarlarda çalışılmamasını önermektedir [12].

Kömür damarının eğiminin 0-20 derecede olmasının en iyi sonuç verdiği genel yargıdır ancak çok daha dik damarlarda da başarılı YKG uygulamaları yapıldığı bilinmektedir [15]. Damarın eğimine bağlı olarak uygun bir bağlantı yöntemi seçilmelidir [14]. Kömür tabakasındaki şistler de istenmeyen bir durumdur [14].

Yeraltı kömür gazlaştırma tesisinin kurulacağı bölgenin özellikleri; çalışma koşulları, ekonomi, süreç verimi ve çevre kirliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Ekonomi açısından incelenecek olursa bölgenin ulaşımının kolay ve düz bir alan olması donanım ve malzemelerin taşınması ve kurulumu için bu önemli bir özelliktir. Ayrıca kurulacak güç tesisinin bölgeye yakın olması istenir. Tesisin sahaya yakın olmaması durumunda, gazın taşıma maliyeti, düşük ısı değeri gazdan elde edilecek gücün getirisinden fazla olacaktır.

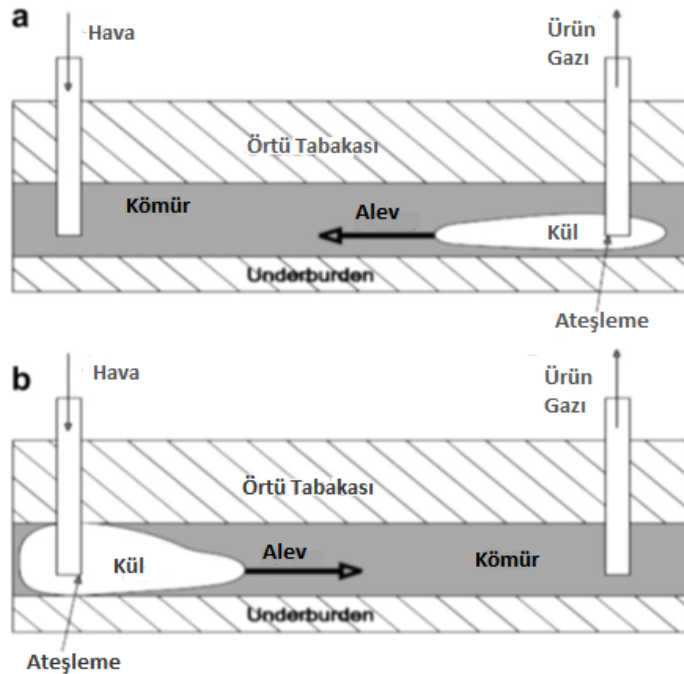
Çevre kirliliği açısından ele alındığında ise, yeraltı kömür gazlaştırma işlemi için oldukça önem taşıyan yeraltı suları dikkatle araştırılmalıdır. Proses sonucu açığa çıkan kül ve diğer atıkların yeraltı sularını kirletme riski olduğundan bölgenin yeraltı suyu açısından zengin olmaması gerekmektedir [16].

1.2.4 Kuyular arası bağlantı yöntemleri

YKG tekniğinde, açılan kuyular arasında bulunan kömür damarlarının geçirgenliğinin artırılması işlemi, bağlantı kurma (linking) olarak adlandırılır ve genel olarak dört bağlantı tekniği bulunmaktadır. Bunlar yönlü delme, hidrolik parçalama, elektriksel bağlantı ve bağlantılı düşey kuyular (LVW) tekniğidir [17,18]. Bu dört teknikten üzerinde en fazla çalışma yapılan ve yaygın olarak kullanılanı LVW tekniğidir. LVW işleminde geri ve ileri yanma tekniği birlikte kullanılır. Geri yanma tekniği, ileri yanma işleminden önce kanalın geçirgenliğini arttırmak için ürün kuyusundan gönderilen yakıcı ile kömürün tutuşturulup alevin besleme kuyusuna doğru ilerlemesidir. Bu

şekilde alevin ilerlediği alanda gözenekli bir kanal oluşur ve ileri yanma için gerekli geçirgenlik sağlanmış olur. Şekil 1.4'te LVW yönteminin şematik görünümü verilmiştir.

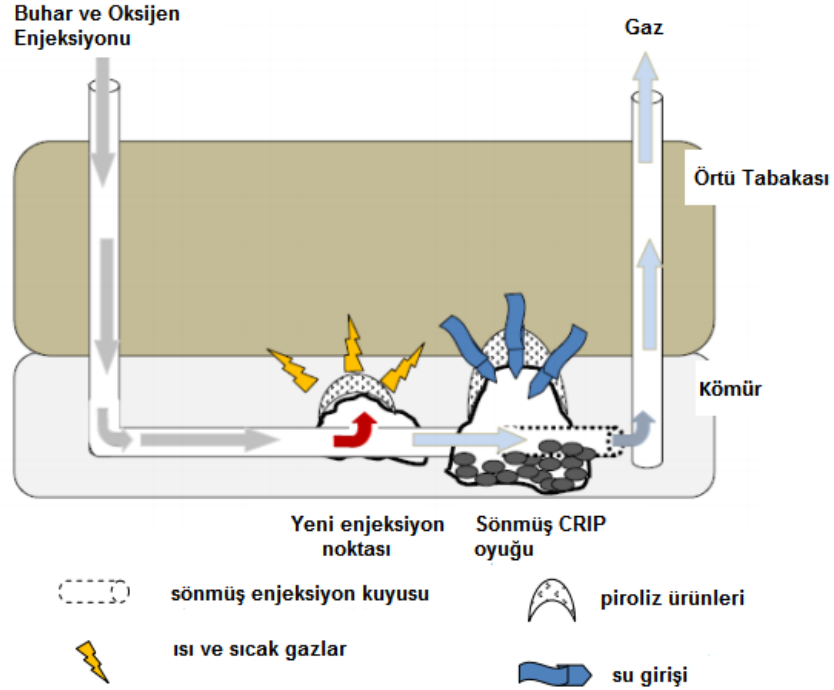
LVW tekniğine alternatif olarak Kontrollü Tepkime Besleme Noktası (CRIP) tekniği LLNL araştırmacıları tarafından 1970'lerde geliştirilmiştir. CRIP yöntemi tek bir yatay ve düşey sondajdan oluşmaktadır. Şekil 1.5'te de görüldüğü gibi gazlaştırma, ürün kuyusunun yakınında başlar ve oluşan oyuk belli bir büyüklüğe geldikten sonra o bölge tükenir, daha sonra besleme noktası kontrollü bir şekilde geri doğru hareket ettirilerek besleme kuyusunun daha yakınında yeni bir oyuk oluşturulur. Bu işlem bütün kömür damarı sönene kadar devam eder [19].



Şekil 1.4: YKG'da ileri ve geri yanma tekniklerinin şematik görünümü. a) Geri yanma. b) İleri yanma [8].

CRIP teknolojisinin, diğer yöntemlere göre birçok üstünlüğü vardır. Bunlardan ilki, yanma noktası kontrol edilebilir olduğu için geniş hacimli damarlarda adım adım gazlaştırma işlemi yapılmasına imkân veriyor olmasıdır. Bir diğer üstünlüğü ise CRIP metodu geçirgenliği düşük, yüksek basınçlı ve derin damarlarda kullanılmaya elverişlidir. Oyuk genişliği kontrol edilebildiği için, ısı kayıpları da azalmakta, dolayısı ile daha yüksek kalitede yapay gaz elde etmek mümkün olmaktadır. Bunların yanında, CRIP metodunun dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar, çatlak örtü katmanı üzerinden üretim kuyusuna hareket eden gaza etkiyen hidrolik basıncın artması,

besleme noktası hareket ettikçe kayaçlara verilen ısı sonucunda termal emisyonların artışı ve elde edilen ürünün ulaşabildiği alanın besleme noktası etrafında 20-25m ile sınırlı olmasıdır.



Şekil 1.5: CRIP tekniğinin şematik gösterimi [20].

1.3 Literatür Araştırması

Yeraltında kömür gazlaştırma ile ilgili literatürde yapılan araştırmalar incelendiğinde, araştırmaların üç farklı kategoride toplanabileceği görülmüştür. Bunların ilki, pilot ölçekli ve gazlaştırılma yapılacak damar üzerinde yapılan saha çalışmalarıdır. Bir diğer çalışma türü ise, YKG sürecinin laboratuvar ortamında sistematik olarak incelenebilmesine olanak sağlayacak şekilde deney düzeneği kurularak benzetiminin yapılması ve buradan elde edilen bilgilerin yorumlanması şeklinde gerçekleşmektedir. Son olarak ise yeraltında bulunan gerçek şartların, gerekse laboratuvar deneylerinin sayısal benzetiminin yapılabilmesi amacı ile yürütülen matematik modelleme çalışmalarıdır.

1.3.1 Saha deneyleri

Amerika'da, Hanna'da, Hoe Creek'te, Centralia'da ve Rocky Mountain'de önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 1972-1977 yılları arasında Laramie Enerji Teknoloji Merkezi (LETC) Hanna, Wyoming'de başarılı saha çalışmaları yürütmüştür. Bu

Çalışma kapsamında üç deneyde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu deneylerin tümünde bağlantılı düşey kuyular (LVW) tekniğı kullanılmıştır. Ortalama 6,7 MJ/m³ ısıl değeri gaz ürün elde edilmiştir. Hanna I 1973'den 1974'e kadar sürmüş ve 5,0 MJ/m³ ısıl değeri gaz ürün elde edilmiştir. Hanna II testi, Hanna I'deki gazın kalitesini ve kaynak kullanımını geliştirmek amacıyla tasarlanmıştır. Hanna II testi üç faza bölünmüştür. Faz I dört ay sürmüş ve 6,0 MJ/m³ ısıl değeri gaz elde edilmiştir. Faz II ve Faz III üç ay sürmüştür. Faz II'de 6,7 MJ/m³'lük, Faz III'de ise 5,4 MJ/m³'lük gaz elde edilmiştir. Hanna III testi bir ay sürmüştür. Gazın ısıl değeri 5,4 MJ/m³'tür [21,22,23,24,25].

Yine 1970'lerde Hoe Creek'te üç deneme yapılmıştır [26,27,28]. Bunlar Hoe Creek I,II ve III olarak adlandırılmıştır. Her üç denemede de kuyular arasındaki geçirgenliğı arttırmak için farklı teknikler uygulanmıştır. Hoe Creek I için hidrolik kırılma tekniğı kullanılarak 3,80 MJ/m³ ısıl değeri gaz ürün elde edilmiştir. Hoe Creek II için ise geri yanma tekniğı kullanılarak 4,03 MJ/m³ ısıl değere sahip gaz üretilmiştir. Hoe Creek III testinde ise yatay sondaj ile geri yanma tekniğı birlikte kullanılarak 8,09 MJ/m³ ısıl değere sahip gaz elde edilmiştir. Yapılan testler, önemli derecede yer altı sularının kirliliğine yol açmıştır [29,30].

1981-1982 yılları arasında Centraia'da CRIP sistemi test edilmiştir. Kömürü tutuşturmak için propan-silan kullanılmıştır. Farklı oksijen/buhar oranları ve farklı sondaj teknikleri kullanılarak, bu değişimlerin yapay gaz kalitesine etkileri gözlemlenmiş ve değişimlerin gaz kalitesini çok fazla değiştirmediğ görülmüştür. Bu deneme CRIP sisteminin ilk gerçek testidir. Ayrıca oyuk büyümesi de test edilmiş ve oyukların şekil ve boyut modelleri üzerine çalışılmıştır [1,31].

1987'de Rocky Mountain I denemeleri gerçekleştirilmiştir. Rocky Mountain IA denemesinde CRIP sistemi uygulanmış Rocky Mountain IB denemesinde ise LVW tekniğı uygulanmıştır. Denemeler sonucunda yüksek kalitede yapay gaz üretilmiştir. 93 günde 14000 ton kömür gazlaştırılmıştır. Amerika'daki en başarılı girişim olmasına rağmen ekonomik destekçi eksikliğinden dolayı ticari boyutlu çalışma planı iptal edilmiştir [32,33].

Kanada'da (Alberta) gerçekleştirilen en önemli proje Swan Hills projesidir. Proje, hükümet tarafından desteklenmiştir. CCS ile donatılmış tesisten 300 MW'lık bir elektrik üretiminin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. 2008 yılında başlayan deneme

alışmalarında 1400 m derinliğindeki kömürler CRIP tekniğiyle yer altında başarılı bir şekilde gazlaştırmıştır. Bu proje dünyadaki en derinde yer alan YKG tesisidir. Deneme çalışmalarından başarılı sonuçların elde edilmesi sonucunda ticari ölçekli uygulamaya geçilmesi kararlaştırılmıştır. Ticari lekli uygulamanın 2015 yılında faaliyete geçmesi planlanmaktadır. Süreci iştletebilmek için oyuk basıncının, rezervuar basıncından daha düştük olması gerektiği, basıncın 0-4 MPa arasında olması gerektiği belirtilmiştir. Sabit bir şekilde çalışabilmek için oksijen besleme oranı günde 3-30 ton aralığında tutulmuş ve su/oksijen kütle oranı da 2-3/1 olarak belirlenmiştir [34,35].

Avustralya’da ise Chinchilla denemeleri 1999’da Linc Energy tarafından Ergo Exergy’nin sağladığı teknoloji kullanılarak yürütülmüştür. Proje ortalama 140 m derinliğinde ve 10 m kalınlığındaki kömürün gazlaştırılması için 9 adet besleme/ürün kuyusu ve 19 izleme kuyusu içermektedir. İlk kez Aralık 1999’da gaz üretimi başlamıştır. Sonrasında tesis gaz üretimini sürekli hale getirmiş ve kapasitesini 80.000 Nm³/h’a çıkarmıştır (Bu rakam günde 675 ton kömürün gazlaştırıldığı anlamına gelmektedir)[14]. 30 aylık süreçte kömür yatağının %95’i, toplam enerjinin %75 dönüşümü ile 35.000 ton kömür gazlaştırılmıştır. Gazlaşma sonunda 300°C ve 10 bar basınçta düştük ısıl değerli (4,5-5,7 MJ/m³) 80×10⁶ Nm³ gaz ürün üretilmiştir [36].

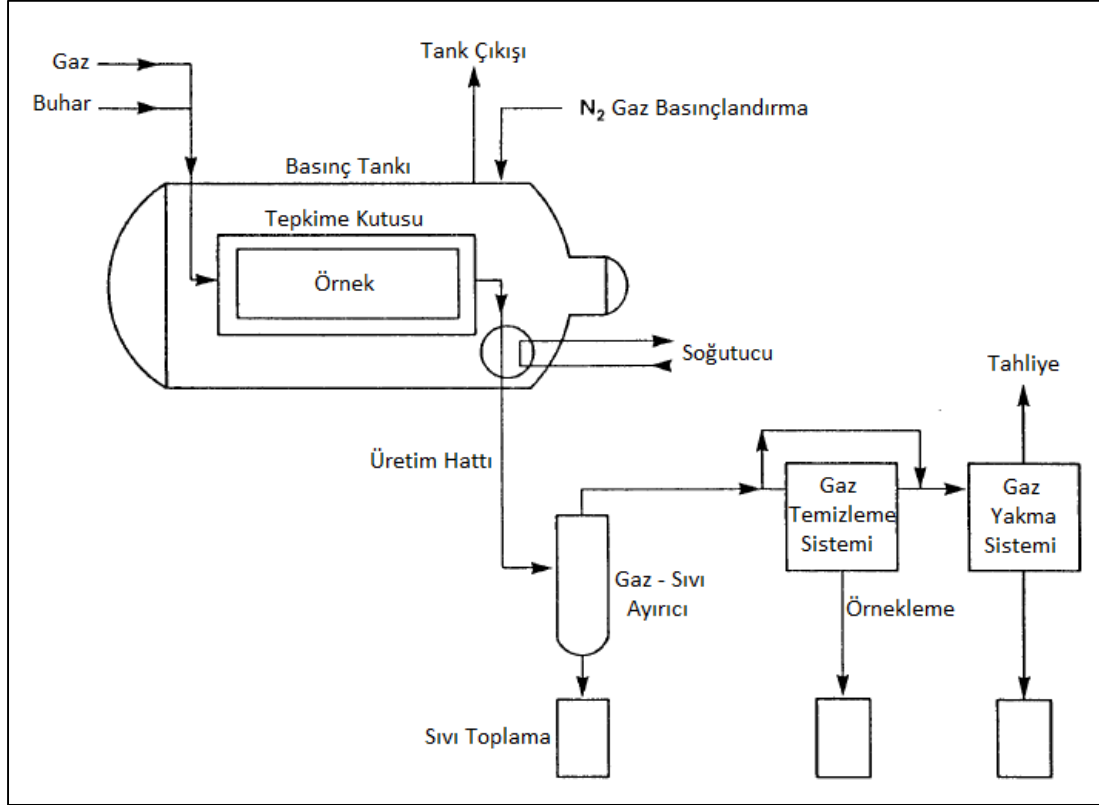
1991’den beri in’de 16 pilot çalışma uygulanmaktadır. in, ticari gübre ve kimyasal üretimi için YKG’den ürettiği yapay gazı hammadde olarak kullanmaktadır. Shanxi Province projesinde ise YKG’den üretilen yapay gaz amonyak ve hidrojen üretimi için kullanılmıştır. Ayrıca Hebei Xin’ao Group ile China niversitesi ortak olup, YKG’den sıvı yakıt üretimi için bir tesis kurmuştur. Bu proje kapsamında yılda 100,000 ton metanol ve yılda 32,4 milyon kWh enerji üretilmiştir [37].

1.3.2 Laboratuvar lekli deneysel alışmalar

Yeraltı kömür gazlaştırma ile ilgili deneysel yayınlar incelendiğinde, çalışmaların ağırlıklı olarak gazlaştırma sonucunda elde edilen yanıcı gazın ısıl değerini arttırmaya yönelik yapılan çalışmalar olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmalarda, yer altı termofiziksel özellikler ve koştullar oluşturularak deneyler yapılmış ve sistem değiştkenlerinin çıkan yanıcı gazın içeriğine ve ısıl değerine ne yönde etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Glaser ve Johnson (1985) tarafından yapılan çalışmada gazlaştırma için hava kullanılmış ve çalışmada yer altı gazlaştırma sonucu ortaya çıkan yanıcı gazın

kalitesinin basınç ile nasıl değiştiği deneysel olarak gözlemlenmiştir. Çalışmalarda kullanılan deney düzeneği Şekil 1.6'da görülebilir. Deneyler 7, 21 ve 35 atm basınç değerlerinde yapılmıştır. Bunun nedeni olarak gazlaştırma işleminin yüksek sıcaklıklarda yapılması ve yüksek sıcaklıklarda metan oluşumunun gerçekleşmemesi gösterilmiştir. Deneyler sonucunda basıncın metan gazı oluşumunu önemli bir oranda etkilemediği gözlemlenmiştir. Oluşan metanın kaynağının piroliz olduğu savunulmaktadır [38].

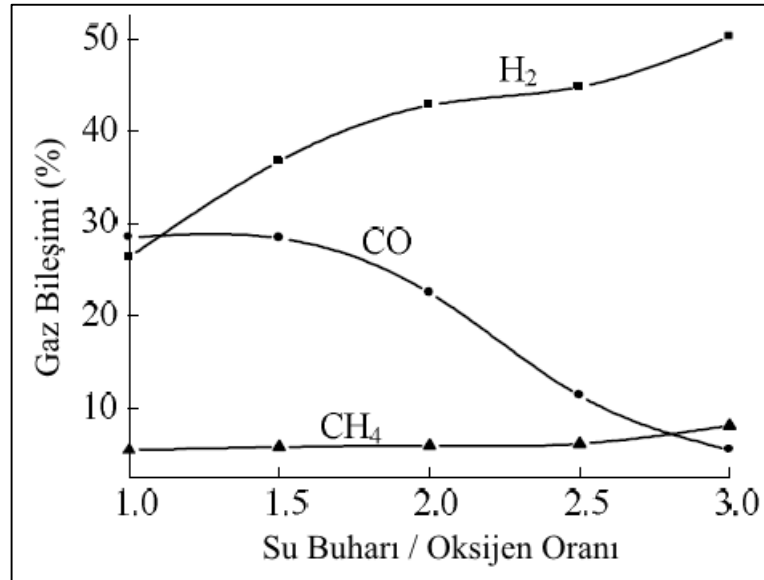


Şekil 1.6: Glaser ve Johnson tarafından kullanılan deney düzeneği [38].

Yüksek basınçlarda kimyasal denge hesaplarından da beklendiği gibi H₂ ve CO gazları oluşumu azalmaktadır. Bu nedenle yapay gaz içeriğinin kimyasal denge hesaplamalarına uygun olduğu gözlemlenmiştir. Üç farklı basınç ile yapılan deneylerde havanın kütsel akısının bağlı olarak kütle transferinin oyuk oluşumuna etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Yatay ve dikey gazlaştırma ünitelerinin verimindeki değişikliklerin basıncın fonksiyonu olması reaktör geometrisindeki değişikliğe atfedilebileceği sonuçlarda ortaya konmuştur. Deneylerde yüksek basınç değerlerinde gaz akışındaki sorunlar nedeniyle sapmalar gözlemlenmiştir. 21 atm basınçta yapılan deneylerde cüruf birikiminin akışı bozduğu görülmüştür. Test sonuçlarında akıştaki bozulmalara bağlı olarak özellikle oyuk şeklinde değişiklikler gözlemlenmiştir. Ayrıca

elde edilen gazın ısı değeri yüksek basınç değerlerinde azaldığı deneyin sonuçlarından biridir [38].

Liu ve diğ. (2009) çalışmalarında yer altı kömür gazlaştırma işleminde H_2 gazı üretimini laboratuvar ölçekli düzeneğe yapılan deneyler sonucunda incelemişlerdir. Linyitin pirolizi, gazlaşma aktivitesi, oksijen-buhar gazlaştırma yöntemi ve yer altı suyunun sisteme girişinin etkisi deneylerde göz önüne alınan ve üzerinde durulan noktalardır. Ayrıca linyitin dengeli bir gazlaştırma sisteminde ne gibi avantajlara sahip olduğu da çalışmanın bir diğer odak noktası olarak bu çalışmada öne çıkmaktadır. Yapılan deneylerin sonucunda linyitin gazlaştırma için iyi bir maden olduğu, CO_2 gazı bozunmasının $850\text{ }^{\circ}C$ için %50'ye yakın, $950\text{ }^{\circ}C$ sıcaklığın üzerinde ise %96 değerine ulaşması ile anlaşılmaktadır. Hidrojen oluşumu için kömürün pirolizi önemli bir kaynak olduğu belirtilmiştir [39].

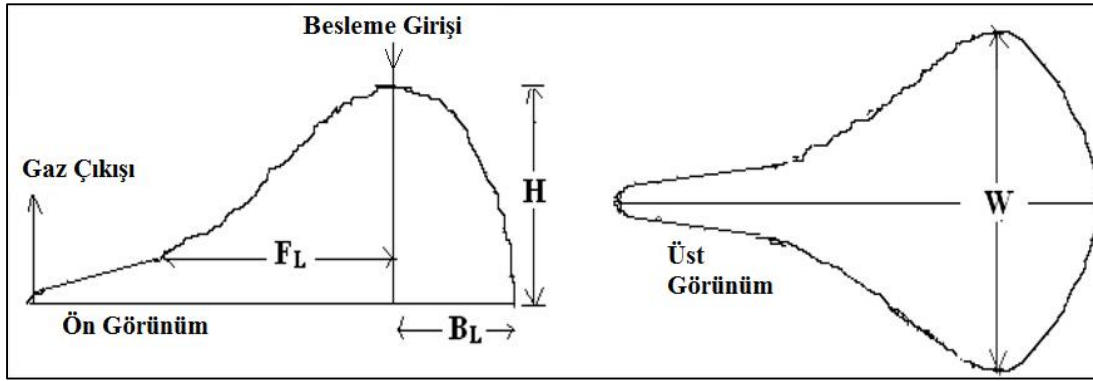


Şekil 1.7: Liu v.d tarafından yapılan çalışma sonucu buhar-oksijen oranının yanıcı gaz oluşumuna etkisi [39].

Özel yakma koşullarında $350\text{ }^{\circ}C$ sıcaklığın üzerinde kömürden hidrojen gazı salınımı olmaktadır ve çıkan hidrojen gazı debisi $725\text{--}825\text{ }^{\circ}C$ arasında en yüksek değerini almaktadır. Çalışmada, su buharı/oksijen besleme oranının etkisi de araştırılmıştır ve sonuçları Şekil 1.7'de gösterilmektedir. Optimum buhar-oksijen oranı koşullarında besleme yapılarak (2:1) %40-50 H_2 gazı derişimine sahip yanıcı gaz elde edilebilmiş ve bu süreç içerisinde linyit kömürü gazlaştırma için uygun koşullarda kalmıştır. Yer altı suyu akışının da belli jeolojik koşullarda basınç kontrolü ile hidrojen hazırlama

için kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada suyun kütlesinin kömür kütlesine oranı 0,4 iken en uygun oksijen gazlaştırması yapıldığı gözlenlenmiştir [39].

Yer altı kömür gazlaştırma için en önemli etkenlerden biri olan oyuk oluşumu Daggupati v.d. (2010) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Oyuk oluşumunun ilk aşamalarında sıcaklık alanını dengede tutmak için sadece yakma uygulanmıştır. Bu çalışmada linyitin gazlaştırılması sırasında meydana gelen oyuk oluşumu yapılan 29 ayrı operasyon ile incelenmiş, gaz giriş ve çıkış kaynakları arasındaki uzaklık, oksijen gazı besleme debisi ve deney süresi gibi tasarım ve operasyon parametrelerinin oyuk oluşumundaki etkisinin ne şekilde olduğu analiz edilmiştir. Çeşitli yönlerde oyuk hacmi ve boyutlarının değişimi için deneye dayalı bağıntılar türetilmiştir [40].

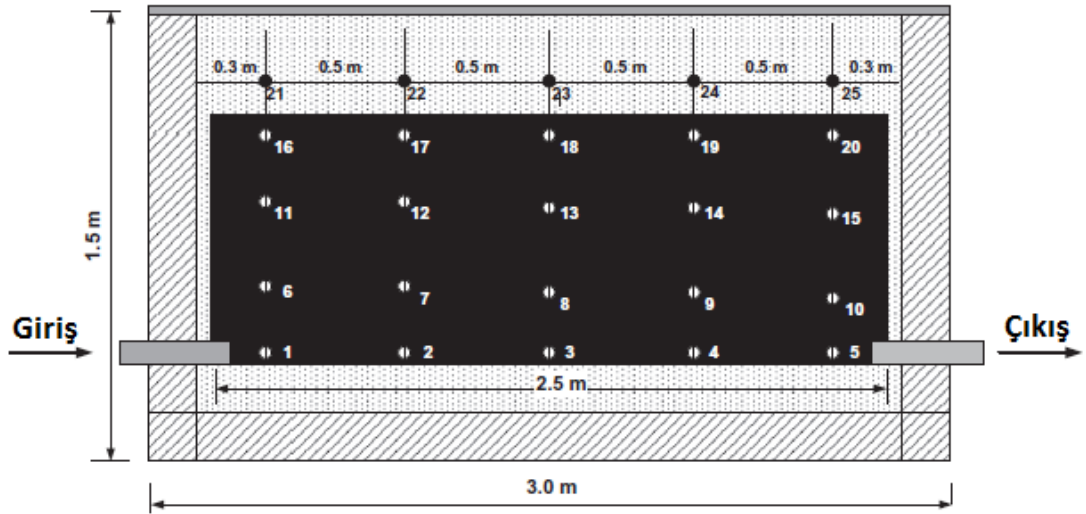


şekil 1.8: Daggupati v.d tarafından yapılan çalışmalar sonucu tahmin edilen oyuk geometrisi [40].

Sonuç olarak geri yanma ile oluşan oyuk uzunluğunun oyuğun yüksekliğinden ve besleme noktasındaki genişliğinden daha küçük olduğu tespit edilmiştir (şekil 1.8). Ayrıca yanma ilerlemesi ile oluşan oyuğun uzunluğunun oyuk yüksekliği ve geri yanma oluşan oyuk uzunluğundan daha büyük değere sahip olduğu ele edilen sonuçlar arasındadır. Dikey yönde oyuk büyümesi oranının ise yapılan farklı deneylerde 1,6-5 cm/saat olduğu elde edilmiştir. Bununla birlikte ileri ve enine oyuk büyümesinin dikey yöndeki büyüme kadar önemli olduğu yapılan çalışmadan net bir şekilde anlaşılmaktadır. Gaz giriş ve çıkış kaynakları arasındaki uzaklığın artışının ileri ve geri oyuk uzunlukları ve oyuğun hacmini küçülttüğü deneyden elde edilen veriler arasındadır. Bunun aksine mesafe artışı dikine ve enine oyuk büyümesine arttırıcı yönde etki etmektedir. Kaynaklar arası mesafenin artması, kanal içerisinde basıncı düşümünü arttırdığı ve bunun sonucunda dikey yönde oyuk büyümesinin geliştiği tespit edilmiştir. Oksijen gazı besleme debisinin artışının da düzenli bir şekilde oyuk büyümesini arttırıcı yönde etki ettiği gözlenlenmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalar

için ise farklı kömür türleri ve gazlaştırma ajanı kullanılmasının yararlı olacağı öngörülmüştür [40].

Stanczyk ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada linyitin yer altında gazlaştırılması sonucu hidrojen zengin bir yanıcı gaz elde edilmesini kurulan reaktör düzeneğinde (Şekil 1.9) yer altındaki ortamın modellenmesi ile irdilemişlerdir. Yapılan 54 saatlik deneylerde linyitin gazlaştırılması işleminde oksijen ve buhar kullanılmıştır. Deneyler tutuşturma aşaması, oksijen besleme aşaması ve buhar besleme aşaması olarak 3 aşamaya ayrılmıştır. Linyitin buharla ile gazlaştırılması sonucunda elde edilen yanıcı gazın ısı değeri $7,8 \text{ MJ/m}^3$ ve hacimce H_2 içeriği %46,3'tür. Bununla birlikte ani sıcaklık düşüşleri ve çıkan yanıcı gaz miktarının düşüklüğü, deneyde kullanılan hacimce %53 nem içeriğine sahip linyit için buharla gazlaştırma yönteminin uygun olmadığını göstermiştir. Değişken olmayan işlem koşullarında oksijenle gazlaştırma sonucu elde edilen gazın ısı değeri $5,2 \text{ MJ/m}^3$, üretilen gazın hacimsel debisi $16 \text{ m}^3/\text{saat}$ ve üretilen gazın içeriğinde hacimce %26 H_2 bulunduğu tespit edilmiştir [41].



Şekil 1.9: Stanczyk v.d tarafından kullanılan reaktör [41].

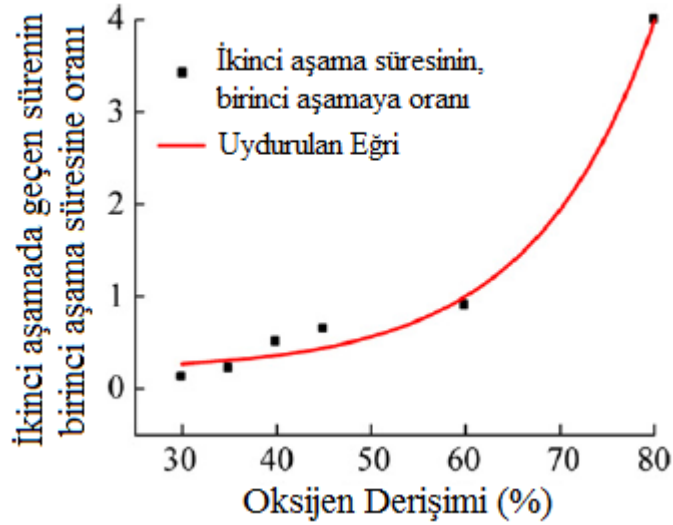
Elde edilen sonuçlardan gazlaştırılan kömürün nem içeriğinin gazlaştırma işleminde çok önemli bir yeri olduğu ve elde edilecek olan yanıcı gazın içeriğini önemli bir biçimde etkilediği görülmüştür. Deneyler sonucunda kömür sahalarında yapılacak yer altı çalışmalarıyla ilgili olarak iki önemli ölçüt ortaya konmuştur. Bunlardan ilki nem kontrolü ve linyit yatağıyla etrafındaki katmanlar arası su akışının düzenlenmesidir. Diğeri ise tepkime yüzey alanının artması için büyük linyit yataklarında çalışma yapmanın daha iyi olacağı yönündedir [41].

Stanczyk ve diğ. (2011) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise linyit ve taş kömürü bloklarının yer altında gazlaştırılması ile ilgili deneysel bir çalışma yapılmış ve elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan 30 ve 50 saatlik deneylerde gazlaştırma için oksijen, hava ve oksijence zenginleştirilmiş hava kullanılmıştır. Çalışmalarda gazlaştırma için sadece hava kullanılması durumunda sıcaklıklarda ani düşme, elde edilen gaz kalitesinde bozulma ve gazlaştırma tepkimelerinde durma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu noktada hava besleme debisinin $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 'ten $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 'e çıkarılmasının da sıcaklıklardaki düşüşünü engellemeyi başaramadığı belirtilmektedir. Söz konusu durumun oluşmasında linyit içerisinde bulunan %53 gibi yüksek nem değerinin oldukça etkili olduğu savunulmuştur. Sonuç olarak oksijen ile hava karışımının hacimsel oranı uygun bir seviyede iken gazlaştırmanın başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Linyit için yapılan deneylerde oksijen-hava karışımı hacimsel oranı (2:1) olduğunda gazlaştırma sonucu elde edilen yanıcı gazın içeriğinde hacimsel olarak %23,1 H_2 gazı ve %6,3 CO gazı bulunduğu ve yanıcı gazın ısı değeri $4,18 \text{ MJ}/\text{m}^3$ olduğu tespit edilirken, taş kömürü için yapılan deneylerde oksijen-hava karışımı hacimsel oranı (2:3) olduğunda gazlaştırma sonucu elde edilen yanıcı gazın içeriğinde hacimsel olarak %18,7 H_2 gazı ve %17,3 CO gazı bulunduğu ve yanıcı gazın ısı değeri $5,74 \text{ MJ}/\text{m}^3$ olduğu tespit edilmiştir. Linyit ile yapılan çalışmalarda kömür bloğu sıcaklığının yükseltilmesinde güçlük çekilmesi dolayısı ile düşük nem içeriğine sahip linyitlerin yeraltı gazlaştırmada daha iyi sonuç vereceği tespit edilmiştir. Ayrıca oksijence zenginleştirilmiş hava ile yapılan gazlaştırma deneylerinde ideal oksijen-hava karışımı oranının reaktörün geometrisi ile önemli ilişkisi olduğu tespit edilmiş ve ileride yapılacak çalışmalarda bunun göz önüne alınması gerektiği vurgulanmıştır [42].

Hongtao ve diğ. (2011) gazlaştırma sonucu açığa çıkan yanıcı gazın ısı değerini arttırmak ve gaz üretim süresini uzatmak için iki aşamalı gazlaştırma yöntemini denemişlerdir. Bu işlem için oksijence zenginleştirilmiş havanın sıcaklık arttırıcı gaz, su buharının ise temel gazlaştırıcı olarak kullanıldığı, iki aşamalı bir deney kurgulanmıştır. Açığa çıkan gazın içeriği, gazlaştırma aşamalarında geçen zamanın birbirine oranı ve sıcaklık alanının ne şekilde değiştiği yapılan çalışmada analiz edilmiştir. Oksijenin zenginleşmesinin iki aşamalı gazlaştırma işleminin ilk aşamasının süresini kısalttığı ve ikinci aşamanın süresini ise uzattığı sonuçlardan elde edilmiştir [43].

Çalışma kapsamında %30, %35, %40, %45, %60, %80 oksijen derişiminde deneyler yapılmış ve bunun sonucunda birinci aşamada geçen sürenin ikinci aşamada geçen süreye oranı sırasıyla 1/0,12; 1/0,21; 1/0,51; 1/0,64; 1/0,90; 1/4 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler Şekil 1.10'da grafiğe dökülmüş ve sonuçlara bir eğri uydurulmuştur. Deneyssel olarak bulunan denklem şu şekildedir:

$$y = 0.00788e^{\frac{x}{0.12946}} + 0.18814 \quad (1.15)$$



Şekil 1.10: Çift aşamalı gazlaştırma sürecinde, aşamalar arası sürenin oksijen derişimine bağlı değişimi [43].

Sisteme buhar gönderilmesi sonucunda sıcaklık alanındaki değişimin oranı zamanla azalacak şekilde 19,1-27,4 °C/dk ile 2,3-6,8°C/dk arasında olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sıcaklık alanındaki değişimin oranı gazlaştırmanın ilk aşamasında artan oksijen derişimi ile artmaktadır. Ayrıca elde edilen yanıcı gazın ısıl değerinin gazlaştırmanın ilk aşamasında artan oksijen derişimi ile büyüdüğü deneyler sonucunda elde edilen veriler arasındadır. Oksijence %80 derişimi ile gönderilen havanın sistemden elde edilen en yüksek ısıl değeri verdiği ve ayrıca en uzun süre gaz elde edilmesini sağladığı da deneylerden gözlemlenmektedir. Reaktörden elde edilen yanıcı gazın değişen oksijen derişimindeki ısıl değerinin 5,31 MJ/Nm³ ile 10,54 MJ/Nm³ arasında değiştiği deneyin sonuçları arasındadır [43].

Kacur ve diğ. (2014) çalışmalarında, laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneği yardımı ile yakıcı gazın, gazlaştırma sonucu elde edilen yanıcı yapay gazın ısıl değerine etkisi incelenmiştir. Bunun yanı sıra gazlaştırıcının yakıcı kısmındaki sıcaklığın, elde edilen yanıcı yapay gazın içeriğine ve ısıl değerine etkisi de

incelenmiştir. Çalışmada gazlaştırıcı olarak öncelikle hava, sonrasında ise oksijen hava karışımı beslemesi yapılmıştır. Yanma alanında sıcaklık etkisi 1 saatlik zaman aralıklarında, sıcaklık ve üretilen yanıcı gazın ısı değeri rejim halindeki değeri kaydedilmiştir. Hava ile yapılan gazlaştırma işleminin yalnızca 1221°C sıcaklıkta gerçekleştiği ve bu sıcaklıkta elde edilen yanma sonu yapay gazı ortalama ısı değeri 2,9 MJ/m³ olduğu tespit edilmiştir. Oksijen hava karışımı ile yapılan deneylerde ise 1146°C sıcaklıkta elde edilen yanıcı gazın ortalama ısı değeri 8,18 MJ/m³ olarak tespit edilmiştir. Bu sıcaklıkta oksijen hacminin hava hacmine oranı %17'dir. 1089°C sıcaklıkta 8,21 MJ/m³ elde edilen ısı değeri deneyler sırasında en yüksek oksijen hacmi- hava hacmi oranı olan %31,89 değerinde gerçekleşmiştir. Sonuç olarak doğru oksijen hava oranının bulunmasının, gazlaştırma işleminin verimini arttırmadaki en önemli etken olduğu ortaya konmuştur [44].

1.3.3 Modelleme çalışmaları

Žogała, A. (2014) tarafından yapılan çalışma iki bölümden oluşmaktadır ve günümüzde yeraltında kömür gazlaştırma sürecinin matematik modellemesinde kullanılan yöntemleri derleyen, her birinin üstünlüklerini, eksiklerini ve dezavantajlarını anlatan bir derleme çalışmasıdır. Birinci bölümde termodinamik denge bağıntılarından yola çıkılarak yapılan hesaplama yöntemleri anlatılmakta, ikinci bölümde ise kimyasal kinetik bağıntılar yardımı ile yapılan hesaplama yöntemi ve YKG süreci için kullanılacak Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (HAD) modellerinde dikkat edilmesi gereken konular yer almaktadır. Birinci bölümde yeraltı kömür gazlaştırmada kullanılan bazı tepkimeler için termodinamik bir yaklaşım yapılmıştır bu tarz modeller denge modelleri olarak adlandırılıp iki kısımda incelenmiştir (stokiyometrik ve stokiyometrik olmayan). Yapılan hesaplamalarda, her iki yöntemin de yaklaşık olarak benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Denge modelleri ile yapılan hesaplama sonuçlarının daha ileride yapılacak çalışmalar için bir ön bilgi sağlamakta faydalı olduğu, ancak bu modellerin sıcaklığın değişimini hesaba katmaması, tüm reaktör içerisinde özelliklerin homojen dağıldığını varsayması, tepkimeler için kullanılan denge sabitlerinin yeterli kesinlikle belirlenemiyor olması gibi sebepler dolayısı ile yetersiz kalmakta olduğu özellikle belirtilmiştir [45].

Çalışmanın ikinci kısmında ise denge modelinden daha gelişmiş modeller olan kimyasal kinetik ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeli ele alınmıştır. Tepkime

kinetiğine ait denklemler piroliz, homojen ve heterojen tepkimeler için ayrı ayrı gösterilmiştir. Çalışmada kömürün tüketilmesi hızının belirlenmesi için kullanılabilecek hacim tepkime modeli, azalan çekirdek modeli, rastgele gözenek modeli, düzeltilmiş hacim tepkime modeli v.b modeller hakkında bilgi verilmiştir. Kuruma ve piroliz hızlarının belirlenmesi için ise birinci dereceden bir formülasyonun yeterli olduğu belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, gazlaştırma süreci için büyük önem taşıyan bazı tepkimeler için literatürde karşılaşılan Arrhenius parametreleri karşılaştırılmıştır. Burada açıkça görülmektedir ki, karşılaşılan bu tepkimeler için genelgeçer Arrhenius parametreleri bulunmamaktadır. Aynı tepkimenin modellenmesi için birçok farklı araştırmacı, birbirinden farklı Arrhenius parametreleri kullanmıştır [46]. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modelleri ile ilgili ise korunum denklemlerine ait yürütücü denklemlerin yanı sıra çalkantı modellemesi konusuna da bilgi verilmiştir. Yazar, matematik modelden istenilen sonucun ne yönde olması istendiğine göre denge, kimyasal kinetik ve HAD yöntemlerinden hangisinin daha pratik bir çözüm olacağını tartışmıştır. Sonuç olarak yeraltında kömür gazlaştırma sürecinin geometriye ve zamana bağlı modellenenebilmesi ve oyuk gelişiminin belirlenebilmesi için kimyasal kinetik denklemlerini de içerisinde barındıran bir HAD modellemesinin gerekli olduğu belirtilmiştir [46].

Yang v.d. (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada silindirik geometriye sahip bir reaktörde gaz fazı kompozisyonları için kütle korunumu ve enerji korunumu denklemleri gerekli başlangıç ve sınır şartlarıyla ele alınmıştır. Matematik model çalışmalarında yapılan kabuller şu şekildedir:

- Temel fiziksel ve termodinamik parametreler, ısı iletim katsayısı, ısı kapasitesi, ısı değişim katsayısı zaman içerisinde değişmemektedir.
- Isı difüzyonu ve basınç difüzyonu ihmal edilmiştir.
- Isıl direncin etkisi ve kohezyon kuvvetinin etkisi ihmal edilmiştir.
- Hava akımının debisinin oksidasyon bölgesindeki kimyasal tepkimeler sonucunda değişmediği kabul edilmiştir.
- Gazlaştırılan kömür bloğunun sürekli, yerel hata ve çatlaklar barındırmadığı varsayılmıştır.
- Yerçekimi etkileri ihmal edilmiştir.
- Açısal yönde değişimler olmadığı varsayılmıştır.

Bu varsayımlar çerçevesinde çözüm uzayı iki boyutlu aksisimetrik koordinatlarda seçilmiştir. Gazlaştırma kanalı ise, bloğun eksenine boyunca geçecek şekilde yine silindirik olarak düşünülmüştür ve bir boyutlu olarak çözülmüştür. Problemde bileşenlerin korunum denklemleri molar şekilde ifadeler ile edilmiştir. Ayrıca ısı transferi için ışıının etkisinin de hesaba katıldığı belirtilmektedir. Kurulan denklem takımının sayısal çözümü için sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Matematik modelin doğruluğunun yapılabilmesi için bir deney düzeneği kurulmuştur. Deneylerde 6 m uzunluğunda, 85 cm yüksekliğinde ve 24 cm genişliğinde bir kömür bloğu kullanılmıştır. Ayrıca deneyler sırasında kömür bloğu 65° açı ile durmaktadır. Deneylerde gazlaştırma ajanı olarak hava kullanılmıştır ve besleme debisi 20 m³/h'tir. Yapılan deneyler sonucunda matematik modelin süreci başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmüştür [47].

Shirazi (2012) tarafından yapılan çalışmada, yeraltında kömür gazlaştırma işleminin modellenmesi ile ilgili geniş bilgiler verilmiş ve buna uygun olarak sayısal çözüm yöntemi önerilmiştir. Kömür bloğu ve gazlaştırma kanalı, değişken gözenekliliğe sahip tek bir gözenekli ortam olarak ele alınmıştır. Gözeneklilik ise kuruma, piroliz, yanma ve gazlaşma gibi etkilere bağlı olarak değişken alınmıştır. Çözüm iki farklı paket program kullanılarak, iki farklı yaklaşım ile çözülmeye çalışılmıştır. İlk yaklaşımda, sonlu elemanlar yöntemi kullanan COMSOL paket programı kullanılmıştır. Bu program kullanılarak yapılan çözümlemelerde problem Kartezyen koordinatlarda ve iki boyutlu olarak ele alınmıştır [48]. Fakat COMSOL paket programı kullanılarak üç boyutlu bir çalışma yapılmak istendiğinde çözümde sorunlar yaşandığı belirtilmiştir [49]. Bu nedenle üç boyutlu kartezyen koordinatlarda çözüm, ANSYS FLUENT paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu modelleme ve yaklaşımın, oyuk büyümesini tahmin edebildiği görülmüş, sonuçlar Daggupati v.d. tarafından yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Literatür özetinden görüldüğü gibi, yeraltı kömür gazlaştırması için farklı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bununla birlikte tüm bu modeller iki temel grupta toplanabilir. Birinci gruptaki modellerde, kömür tepkimeye girerek tükenmekte ve kömür yüzeyi yer değiştirmekte (azalan çekirdek) (shrinking core), diğer gruptaki modellerde ise kömür tepkimeye girdiğinde, o bölgenin gözenekliliği artmaktadır (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1: YKG ile ilgili gerçekleştirilen metamatik modelleme çalışmaları.

Ref. No.	Yazarlar	Tarih	Oyuk Modeli	Çözüm Uzaı	Sayısal Yöntem	İncelenen Parametreler
[50]	Biezen ve diğ.	1995	Azalan Çekirdek	Kartezyen 3 Boyutlu	Sonlu Hacimler Multigrid	Oyuk Gelişimi
[51]	Biezen, E.N.J.	1996	Azalan Çekirdek	Kartezyen 3 Boyutlu	Sonlu Hacimler Multigrid	Oyuk Gelişimi
[52]	Daggupati ve diğ.	2011	Yok	Kartezyen 3 Boyutlu	Sonlu Hacimler Multigrid	Akış özellikleri, Sistemin giriş şartlarındaki değişime cevap hızı
[53]	Janoszek ve diğ.	2013	Yok	Kartezyen 3 Boyutlu	ANSYS FLUENT	Jeolojik özelliklerin gazlaştırma işlemine etkisi
[54]	Park ve diğ.	1987	Azalan Çekirdek	1 Boyutlu	Özel Yazım Kod	Kuruma, Piroliz ve Gazlaşma bölgelerinin sürecin erken döneminde gelişim hızları
[55]	Perkins ve diğ.	2007	Gözenekli Ortam, Boşluk Oranı	Aksisimetrik (Silindirik) 2 Boyutlu	FLUENT v6.1.18	Sentez gazı özelliklerinin tahmini ve kül tabakasının etkisi
[56]	Seifi ve diğ.	2011	Gözenekli Ortam, Boşluk Oranı	Kartezyen 3 Boyutlu	CMG-STARS	Oyuk gelişimi ve elde edilen gaz bileşiminin zamana bağlı değişimi
[57]	Seifi ve diğ.	2014	-	-	CMG-STARS	Gözenekli ortamda gazlaştırma tepkimeleri parametrelerinin belirlenmesi
[48]	Shirazi ve diğ.	2011	Gözenekli Ortam, Boşluk Oranı	Kartezyen 2 Boyutlu	COMSOL MATLAB	Oyuk Gelişimi
[49]	Shirazi, A.S.	2012	Gözenekli Ortam, Boşluk Oranı	Kartezyen 3 Boyutlu	ANSYS FLUENT	Oyuk gelişimi ve elde edilen gaz bileşiminin zamana bağlı değişimi
[58]	Shirsat, V.A.	1989	Azalan Çekirdek	Kartezyen / Aksisimetrik 2 Boyutlu	Sonlu Elemanlar	Oyuk gelişimi ve elde edilen gaz bileşiminin zamana bağlı değişimi
[47]	Yang ve diğ.	2003	-	Aksisimetrik 2 Boyutlu*	Sonlu Hacimler	Gaz bileşimi ve sıcaklığının zamana bağlı değişimi
[59]	Yang, L.	2004	Gözenekli Ortam, Boşluk Oranı	Aksisimetrik 2 Boyutlu*	Sonlu Hacimler	Gaz bileşimi ve sıcaklığının zamana bağlı değişimi
[60]	Yang, L.	2005	Gözenekli Ortam, Boşluk Oranı	Aksisimetrik 2 Boyutlu*	Sonlu Hacimler	Gaz bileşimi ve sıcaklığının zamana bağlı değişimi
[45] [46]	Žogała, A.	2014	Günümüze kadar yeraltı kömür gazlaştırma çalışmalarında kullanılmış olan çeşitli matematiksel modellerin derlenmesi, anlatımı ve birbirlerine göre üstün ve zayıf oldukları noktaların belirtilerek incelenmesi			

*Bahsi geçen çalışmalarda, gazlaştırma kanalı içerisindeki denklemler tek boyutlu olarak ele alınmıştır.

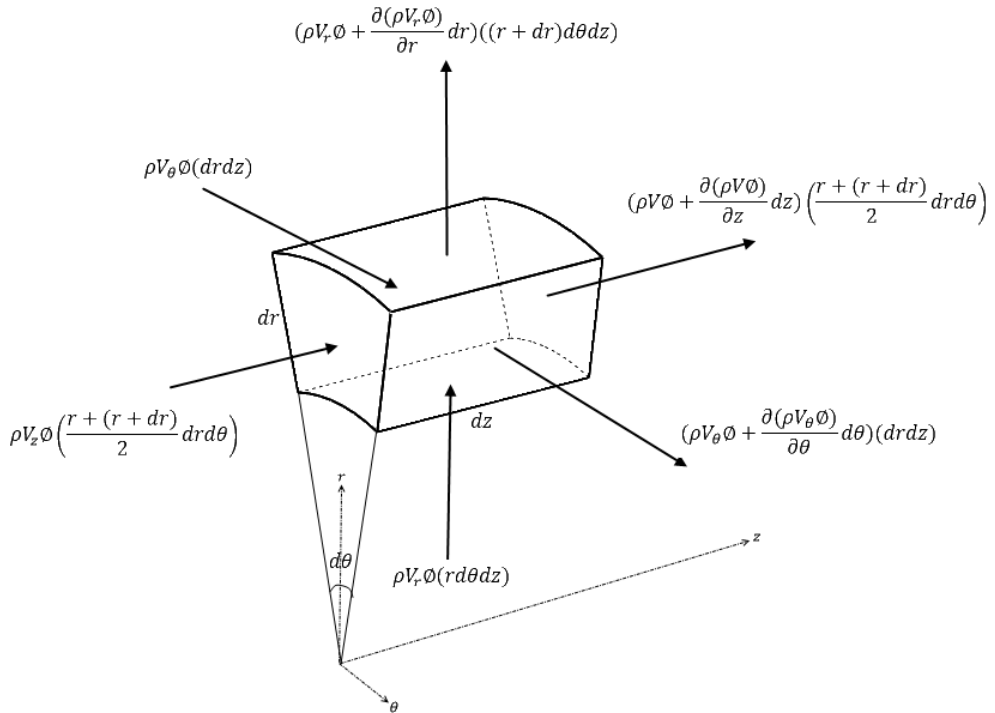
2. KÖMÜR GAZLAŞTIRMA MATEMATİK MODELİ

2.1 Matematik Modelin Kurgusunda Yapılan Kabuller

Model Kabulleri:

- Gaz fazı tek boyutlu, katı fazı aksisimetrik iki boyutlu seçilmiştir,
- Kömürün kuruma süreci ve uçucu gazların çıkışı ihmal edilmiş,
- Kömür (katı fazı) içerisinde difüzyon ve akış etkileri ihmal edilmiştir,
- Gazlaştırma için 3 heterojen ve 3 homojen kimyasal tepkime seçilmiştir,
- Özgül ısıların, ısı iletim katsayılarının ve viskozitenin sıcaklıkla değişmediği kabul edilmiştir.
- Basıncın tüm işlem boyunca ve her noktada sabit 1 atm olduğu varsayılmıştır.

Kömür gazlaştırma modeli kütle, enerji ve momentum korunum denklemlerinin hem gaz fazı ve hem de katı fazı için ayrı ayrı yazılmasıyla elde edilecektir. Şekil 2.1’de seçilen kontrol hacmi gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Silindir blok içerisinde bir kontrol hacmi.

2.2 Gaz Fazı İçin Korunum Denklemleri

Gazlaştırma kanalı boyunca akan gaz, içerisinde farklı bileşenler bulundurmakta, sıcaklığa ve bileşenlerin yüzdesine bağlı olarak yoğunluğu değişmektedir. Gaz fazının çözümü için süreklilik denklemi, her bir bileşen için kütle korunumu ve enerji korunumu denklemleri çözülmektedir. Süreç boyunca oluşan tepkimelerin etkisi kaynak terimleri yardımı ile denklemlere etki etmektedir. Gaz fazı denklemleri gazlaştırma kanalı boyunca bir boyutlu olarak ele alınmıştır.

2.2.1 Kütle korunumu

Gaz fazı için kütle korunum (süreklilik) denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \vec{V}_g) = \dot{S}_m''' \quad (2.1)$$

ρ_g : Gaz yoğunluğu [$\frac{kg}{m^3}$]

V_g : Gaz fazının akış hızı [$\frac{m}{s}$]

$\dot{S}_m'''$: Birim zamanda üretilen kütle miktarı [$\frac{kg}{m^3.s}$]

Burada $\dot{S}_m'''$ terimi, heterojen tepkimeler sonucunda gaz fazında oluşan kütle artışını temsil etmektedir. Bunun nedeni, heterojen tepkimelerin, kömür bloğunun tepkimeye giren yüzelerinden karbonu ‘koparması’dır. Böylece kömür tarafının kütlesi sürekli azalmakta, gaz fazında ise kütle artışı yaşanmaktadır.

2.2.2 Bileşenlerin molar korunumu

Gaz fazı içerisindeki kimyasal bileşenlerin taşınım denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (C_i \vec{V}_g - D \nabla C_i) + S_i \quad (2.2)$$

C_i : i bileşeninin molar derişimi [$\frac{mol}{m^3}$],

V_g : Gaz fazının akış hızı [$\frac{m}{s}$],

D : Kimyasal bileşenlerin molar difüzyon katsayısı [$\frac{mol}{m.s}$],

S_i : i bileşeninin kimyasal tepkimelere bağlı olarak üretim/tüketim terimi [$\frac{mol}{m^3.s}$].

Denklemin çözümünde kullanılacak sınır şartları ise,

$$[C_i]_{z=0} = C_{i,o} \quad (2.3)$$

$$\left[\frac{\partial C_i}{\partial z} \right]_{z=L} = 0 \quad (2.4)$$

olarak belirlenmiştir. Çözümün başlangıç anında ise kanal boyunca derişimler

$$[C_i]_{t=0} = C_{i,t_0} \quad (2.5)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu eşitliklerde $C_{i,o}$, gazlaştırma için kullanılan gaz karışımının giriş şartlarını ifade etmektedir. C_{i,t_0} ise gazlaştırma işlemi başlamadan önce bulunan değerleri ifade etmektedir ve dış havanın bileşimi ile aynı kabul edilmektedir.

2.2.3 Enerji korunumu

Gaz fazı içerisinde akış enerjisinin taşınım denklemi ise aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{i=1}^N C_i \bar{C}_{p,i} T_g \right) = -\nabla \cdot \left[\sum_{i=1}^N \bar{C}_{p,i} (C_i \vec{V}_g - D \nabla C_i) T_g \right] + S_h - \alpha A_k (T_g - T_{surf}) \quad (2.6)$$

T_g : Gaz fazının sıcaklığı $[K]$,

$\bar{C}_{p,i}$: i bileşeninin özgül ısısı $\left[\frac{J}{mol.K} \right]$,

S_h : Tepkimeler nedeni ile açığa çıkan/soğurulan ısı $\left[\frac{W}{m^3} \right]$,

α : Toplam ısı taşınım katsayısı $\left[\frac{W}{m^2.K} \right]$,

A_k : Özgül ısı taşınım alanı $\left[\frac{m^2}{m^3} \right]$,

T_{surf} : Katı-Gaz ara yüzeyinin sıcaklığı $[K]$,

N : Kimyasal bileşenlerin sayısı

Yukarıda verilen denklemin çözümü için önerilen sınır ve başlangıç şartları ise şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$[T_g]_{z=0} = T_{g,o} \quad (2.7)$$

$$[T_g]_{t=0} = T_{g,t_0} \quad (2.8)$$

Yukarıda belirtilen şartlarda $T_{g,o}$ gazlaştırıcı karışımın sisteme giriş sıcaklığını, T_{g,t_0} ise gazlaştırma işlemi başlatılırken sistemin sahip olduğu sıcaklığı temsil etmektedir.

2.3 Katı Fazı için Korunum Denklemleri

Yapılan modelleme çalışmalarında katı fazının tamamen koklaşmış kömürden meydana geldiği düşünülmektedir. Buna bağlı olarak normal bir YKG sürecinde karşılaşılan kuruma ve koklaşma işlemleri göz ardı edilmektedir.

Bu tarz bir yaklaşımın sonucunda, katı fazının yoğunluğunda herhangi bir değişim meydana gelmesi söz konusu olmamaktadır. Katı fazı ancak heterojen tepkimeler neticesine tükenerek azalmaktadır.

Tüm bu nedenler dolayısı ile katı fazı için kütle korunum denklemi özel olarak Bölüm 2.5’de ele alınmıştır. Katı fazı içerisinde herhangi bir kütle geçişi ise söz konusu değildir. Dolayısı ile katı fazı için yalnızca enerji korunum denklemi kapsamlı bir şekilde işlenecektir.

2.3.1 Kütle korunumu

Katı fazı için kütle korunum denklemi yazıldığı zaman, katının kendisinin difüzyonu ve akışı söz konusu olmadığı için denklem oldukça basitleşmektedir.

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} = S_k \quad (2.9)$$

Burada zamana bağlı değişim teriminin tamamen kaynak terimine bağlı olduğu görülmektedir. Ayrıca denklemde, katının yoğunluğunun değiştiği görülmektedir. Bu durum, en başta yapılan, katı fazının özelliklerinin sabit alınması ile ve de azalan çekirdek modeli ile örtüşmemektedir. Bu nedenle, katı fazının zamana bağlı olarak azalması, Bölüm 2.5.2’de ele alınacaktır.

2.3.2 Enerji korunumu

Katı fazı için enerji denkleminin kurgulanmasında, molar değil kütleler değerler kullanılmıştır.

$$\rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (K_{\lambda,s} \nabla T_s) + S_s \quad (2.10)$$

T_s : Katı fazının sıcaklığı [K],

ρ_s : Katı fazının kütle yoğunluğu $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$,

$C_{p,s}$: Katı fazının özgül ısısı $\left[\frac{J}{kg.K}\right]$,

$K_{\lambda,s}$: Isı iletim katsayısı $\left[\frac{W}{m.K}\right]$,

S_s : Katı fazında birim hacimde ısı üretimi/tüketimi $\left[\frac{W}{m^3}\right]$.

İki boyutlu olarak ele alınan bu difüzyon denkleminin çözümü için dört adet sınır şartına ihtiyaç vardır. Kömürün yalıtım ile temas halinde olan yüzeylerinde, yalıtım kalınlığı, yalıtımın ısı iletkenliği, reaktörün et kalınlığı, reaktör malzemesinin ısı iletim katsayısı ve reaktör yüzeyinin dış ortamda sebep olduğu doğal taşınımı temsil eden ısı taşınım katsayısının etkilerini göz önüne alan, tüm bu etkileri temsil eden bir toplam taşınım katsayısı ile dış ortama kaybedilen ısı geçişi bir sınır şartı olarak kullanılmaktadır.

$$h_{etken} = \frac{1}{\frac{1}{h_{doğal\ taşınım}} + \frac{L_{reaktör}}{k_{reaktör}} + \frac{L_{yalıtım}}{k_{yalıtım}}} \quad (2.11)$$

$$K_{\lambda,s} \left[\frac{\partial T_s}{\partial r} \right]_{z=0} = h_{etken} ([T_s]_{z=0} - T_{\infty}) \quad (2.12)$$

$$-K_{\lambda,s} \left[\frac{\partial T_s}{\partial r} \right]_{z=L} = h_{etken} ([T_s]_{z=L} - T_{\infty}) \quad (2.13)$$

$$-K_{\lambda,s} \left[\frac{\partial T_s}{\partial r} \right]_{r=r_1} = h_{etken} ([T_s]_{r=r_1} - T_{\infty}) \quad (2.14)$$

Denklem 2.11 uygulanarak yapılan hesaplamalarda, h_{etken} için uygun değerin 0,5 $[W/m.K]$ olduğu saptanmıştır.

Katı ile gaz fazları arasındaki ara yüzeyde ise dikkate alınması gereken iki konu bulunmaktadır. Bunlardan ilki, katı fazı ile gaz fazı arasında gerçekleşen ısı transferidir. Bu ısı transferini ifade eden terim, gaz fazı için enerji taşınım denkleminin

son terimidir. Aynı etkinin katı fazı için ifadesi ise bir sınır şartı olarak ele alınmaktadır. İkinci konu ise, heterojen tepkimeler sonucunda ortaya çıkan (ya da tepkimeler tarafından harcanan) ısıdır. Tepkimeler, katı yüzeyinde çok ince bir tabakada gerçekleştiği için, açığa çıkan tüm ısının katı fazı tarafından emildiği, ya da endotermik tepkimeler için konuşulursa, tepkimelerin gerçekleşmesi için soğurulan ısının katı fazı tarafından sağlandığı kabul edilmiştir.

$$-K_{\lambda,s} \left[\frac{\partial T_s}{\partial r} \right]_{r=r_0} = S_{surf} - \alpha(T_{surf} - T_g) \quad (2.15)$$

Denklemin başlangıcında, katı fazının her noktasının, sabit sıcaklıkta olduğu kabul edilmiştir.

$$[T_s]_{t=0} = T_{s,t_0} \quad (2.16)$$

2.4 Kimyasal Tepkimeler

Problemin çözümünde ele alınan kimyasal tepkimeler, bileşenlerin derişimlerine ve gaz ile katı fazının sıcaklık dağılımına son derece duyarlıdır. Bu özellik neticesinde, önceki bölümde bahsi geçen enerji ve bileşenlerin üretim ve/veya tüketim terimleri, kimyasal kinetik etkileşimler sonucunda tüm bu denklemlerin birbirine olan bağılılıklarını en yüksek derecede arttıran terimler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bahsi geçen bu terimlerin değerlerinin hesaplanması, Arrhenius temelli kimyasal kinetik çözümleme ile yapılmaktadır. Herhangi bir tepkimenin ileri yönlü tepkime hız sabiti, Arrhenius denklemi ile ifade edilmektedir:

$$k_{f,j} = A_j T^{\beta_j} e^{\left(\frac{-E_{a,j}}{RT}\right)} \quad (2.17)$$

$k_{f,j}$: j tepkimesine ait ileri yönlü tepkime hız sabiti,

A_j : j tepkimesi için belirlenmiş frekans faktörü,

β_j : j tepkimesi için sıcaklık üsteli,

$E_{a,j}$: j tepkimesinin etkinleşme enerjisi $\left[\frac{J}{mol}\right]$,

R : Evrensel gaz sabiti $\left[\frac{J}{mol.K}\right]$,

T : Ortam sıcaklığı $[K]$.

Burada tanımlanan değişkenlerden A_j , β_j ve $E_{a,j}$, her bir tepkime için ayrı ayrı tanımlanır ve Arrhenius Parametreleri olarak isimlendirilir. Zogala, A. tarafından yapılan çalışmalarda, yeraltı kömür gazlaştırma işlemi sırasında meydana gelen temel tepkimelere ait literatürde bulunan farklı Arrhenius parametreleri incelenmiştir[16-17]. Bu inceleme sonucunda da görülmektedir ki, bilimsel literatürde, söz konusu parametrelere dair oldukça farklı sayısal değerler bulunmaktadır ve herhangi bir tepkime için tek bir doğru seçenekten bahsedilememektedir. Tarafımızca yürütülen sayısal modelleme çalışmalarında, literatürde incelenen bir çalışmada temel alınan Arrhenius parametreleri kullanılmaktadır [11]. Bu parametrelerde tüm tepkimeler için sıcaklık üsteli β , sıfır alınmıştır ($\beta_j = 0$).

Kimyasal tepkimeler, temel olarak iki kategoride incelenebilmektedir.

- Homojen Tepkimeler: Bu tepkimelerde, tepkimeye girenler ve ürünler aynı fazdadır.
- Heterojen Tepkimeler: Birden fazla fazı içeren tepkimelerdir.

Çizelge 2.1: Yeraltı gazlaştırma işleminin temel tepkimeleri ve kullanılan Arrhenius parametreleri ($\beta_j=0$).

	Tepkime					ΔH [kJ/mol]	A	E_a [kJ/mol]	Ref.
Heterojen	C	+	O ₂	→	CO ₂	-393	1,67E+02	100,4	[61]
	C	+	CO ₂	→	2 CO	+172	3,33E+02	91	[61]
	C	+	H ₂ O	→	CO + H ₂	+131	1,67E+02	131	[61]
Homojen	CO	+	H ₂ O	→	CO ₂ + H ₂	-41	2,78E+00	12,5	[60]
	CO	+	½ O ₂	→	CO ₂	-283	7,50E-02	247	[60]
	H ₂	+	½ O ₂	→	H ₂ O	-242	9,87E+08	31	[48]

Yeraltı kömür gazlaştırma çalışmalarında, kömür yüzeyinde karbonun yanması ve gazlaştırma tepkimeleri, heterojen tepkimelerdir. Homojen tepkimeler ise karbonmonoksit ve hidrojenin yanma tepkimeleri ile su buharı ve karbonmonoksit arasında gerçekleşen oksijen alışverişidir. Bu tepkimeler Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Tepkime hızı ifadesi, homojen ve heterojen tepkimeler için benzer bir şekilde tanımlanmış olmalarına rağmen, birimleri farklıdır. Homojen tepkimelerde hız, birim hacim için ifade edilirken, heterojen tepkimelerde hız birim alan için yazılmaktadır.

Heterojen tepkimeler için hız ifadesi:

$$R_{s,j} = k_{f,j} \prod_{i=1}^N P_i^{m_{i,j}} \quad (2.18)$$

$R_{s,j}$: Heterojen j tepkimesinin hızı $\left[\frac{mol}{m^2s}\right]$,

P_i : i bileşeninin kısmi basıncı $[Pa]$,

$m_{i,j}$: i bileşeninin, j tepkimesi için etkinlik üsteli.

Burada kısmi basınçlar, ideal gaz denklemi kullanılarak molar derişimler cinsinden de ifade edilebilir.

$$P_i = [C_i]RT_g \quad (2.19)$$

Homojen tepkimeler için hız ifadesi ise

$$R_{v,j} = k_{f,j} \prod_{i=1}^N [C_i]^{m_{i,j}} \quad (2.20)$$

$R_{v,j}$: Homojen j tepkimesinin hızı $\left[\frac{mol}{m^3s}\right]$

olarak ifade edilir.

Tepkimeler sonucu bileşenlerin değişimini ifade eden kaynak terimi şu şekildedir:

$$S_{C_i} = \frac{d[C_i]}{dt} = \sum_{j=1}^{K_s} \nu_{i,j} R_{s,j} A_k + \sum_{j=1}^{K_v} \nu_{i,j} R_{v,j} \quad (2.21)$$

$\nu_{i,j}$: i bileşeninin j tepkimesi için stokiyometrik katsayısıdır ve $\nu_{i,j} = \nu''_{i,j} - \nu'_{i,j}$ olarak tanımlanır.

Gaz fazı için enerjinin taşınım denklemi, bir kontrol hacmi için yazılmıştır. Bu nedenle birim yüzey için ifade edilen heterojen tepkime hızlarının, kömür yüzeyinden taşınım ile gerçekleşen ısı transferini yazarken yapıldığı gibi, özgül alan değeri kullanılarak hacimsel ifadeye dönüştürülmesi gerekmektedir.

$$A_k = \frac{\text{Tepkimeye giren kömür yüzey alanı}}{\text{Toplam gaz hacmi}} \quad (2.22)$$

Burada dikkat edilmesi gereken konu, kömürün gözenekli yapısıdır. Söz konusu bu gözenekli yapı dolayısıyla gaz ile kömürün etkileşime geçtikleri yüzey alanı yalnızca makro ölçekli bir şekilde ele alınamaz. Geliştirilen modelde, gaz fazının kömür içerisinde belli bir derinliğe kadar (δ_{GND}) nüfuz ettiği düşünülmektedir. Bu derinlik boyunca kömür içerisindeki gözeneklerin sebep olduğu her yüzeyin, tepkimeye girmek için elverişli olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca söz konusu mesafe boyunca gazın bileşiminin değişmediği varsayımında bulunulmuştur. Bu şekilde kurgulanmış bir modelde tepkimeye giren bağıl yüzey alanı ele alınan silindirik geometride şu şekilde ifade edilmektedir:

$$A_k = \frac{2\pi r_k S_0 \delta_{GPD} \Delta z}{\pi r_k^2 \Delta z} = S_0 \delta_{GND} \frac{2}{r_k} \quad (2.23)$$

S_0 : Kömürün bağıl yüzey alanı $\left[\frac{m^2}{m^3}\right]$,

δ_{GND} : Gazın kömür içerisine nüfuz derinliği $[m]$,

r_k : Oyuk yarıçapı $[m]$,

Burada r_k sembolü ile tanımlanan değer, kömürün yanma önünün, simetri ekseninden uzaklığıdır ve kömür içerisindeki boşluk geometrisini tanımlar. Kömür içerisindeki boşluk, yanma ve gazlaşma tepkimelerine bağlı karbonun tükenmesi ile gelişmektedir. Eğer tüketilen kömür miktarı bilinir ise, boşluk yarıçapı da hesaplanabilecektir. Bu hesap, Bölüm 2.5’de ayrıntılı olarak işlenecektir.

S_0 değeri ise gözenekli kömür yapısının, birim hacim için içerisinde bulunan özgül yüzey alanını göstermektedir. Bu değer kömürler için uygulanan BET analizleri ile bulunabilmektedir.

Tepkimelerin enerji dengesine etkisi ise, tepkimelerin heterojen ya da homojen olmasına göre farklı ele alınmaktadır. Daha önce de bahsedildiği üzere, heterojen tepkimelerin yaydığı/soğurduğu enerjinin, tamamen katı fazına geçtiği/katı fazından sağlandığı düşünülmektedir. Bu enerji akısı ise, katı ile gaz fazları arasındaki yüzeydeki sınır şartının bir parçası olarak yazılmıştır.

$$S_{sru f} = \sum_{j=1}^{K_s} R_{s,j} \Delta H_{s,j} \quad (2.24)$$

Benzer bir şekilde, gaz fazı içerisinde gerçekleşen homojen tepkimeler sonucu ısı üretimi/tüketimi ise

$$S_h = \sum_{j=1}^{K_v} R_{v,j} \Delta H_{v,j} \quad (2.25)$$

olarak yazılmaktadır.

2.5 Diğer Yardımcı Denklemler

Yeraltında kömür gazlaştırma sürecinin sayısal benzetimi için yukarıda bahsedilen temel taşınım denklemleri tek başlarına yeterli değildir. Çözümün doğru ilerlemesi ve kömürün tüketiminin hesaplanabilmesi için yardımcı bir dizi denkleme ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan ilki süreçte oluşan gazın hal denklemdir. Hal denklemi olarak ise kullanım rahatlığı nedeni ile İdeal Gaz Yasası seçilmiştir. Bir diğer yardımcı denklem ise gazlaştırma kanalının yarıçapının, yani bir diğer deyişle oluşan oyuğun büyüklüğünün zamana bağlı değişimini takip etmek amacı ile kullanılmaktadır.

2.5.1 İdeal gaz yasası

İdeal gaz yasası, termodinamik sistemleri ifade etmekte kullanılan en basit ve en yaygın hal denklemdir. Bu denklem, bir sistemin basıncının, sistemde bulunan gazların toplam derişimine ve sistemin sıcaklığına doğru orantılı olarak bağlı olduğunu söylemektedir.

$$P_g = [C_g]RT_g \quad (2.26)$$

Bu denklemde R, evrensel gaz sabitidir ve değeri $8,314 \frac{J}{mol.K}$ 'dir.

2.5.2 Oyuğun yarıçapı hesabı

Geliştirilen kodun en büyük özelliklerinden birisi de gazlaştırma işlemi boyunca kömür içerisinde oluşacak olan oyuğun boyutunu ve şeklini tahmin edebilmesidir. Bu takip ayrıca heterojen tepkimelerin hesaplanmasında da etkili olmaktadır.

Söz konusu denklem, kömür yüzeyinde oluşan tepkime hızından faydalanarak, birim zamanda ne kadar kömürün tüketildiğini bulmakta ve bu tüketimin ne kadarlık bir yarıçap artışına neden olacağı hesaplanmaktadır. Gazlaştırma kanalında yarıçap artışı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

$$R_k S_0 \delta_{GPD} (2\pi r_k) \Delta z dt = [C_k] (2\pi r_k) \Delta z dr \quad (2.27)$$

Denklem 2.27 sadeleştirilir ise:

$$\frac{dr}{dt} = S_0 \delta_{GPD} \frac{R_k}{[C_k]} \quad (2.28)$$

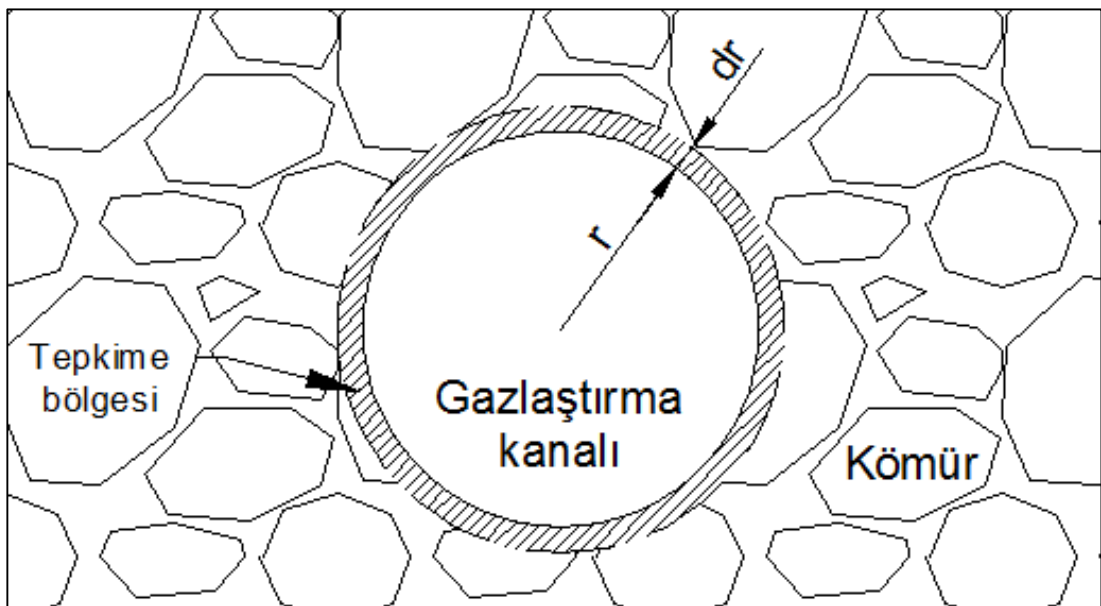
ifadesi elde edilmektedir.

Burada;

R_k : Kömürün heterojen tepkimeler etkisi ile tükenme hızı $\left[\frac{mol}{m^2 s}\right]$,

$[C_k]$: Kömürün karbon derişimi $\left[\frac{mol}{m^3}\right]$,

şeklinde tanımlanmaktadır. R_k terimi her bir kontrol hacminde gerçekleşen heterojen tepkimelerin sonucu kömürün tükenme hızıdır. $[C_k]$ terimi ise kömür içerisinde karbonun molar yoğunluğunu ifade etmektedir. Yukarıda çıkarılan bağıntı sayesinde gazlaştırma kanalı boyunca gazlaşmaya bağlı olarak oluşan ve gelişen oyuğun büyüklüğünü takip etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 2.2: Gazlaştırma kanalında yarıçap artışı.

2.6 Sayısal Çözüm

2.6.1 Ayırıklaştırma tekniği

Önceki bölümlerde anlatılan ve yeraltında kömür gazlaştırma sürecinin matematik modellemesi için kullanılacak olan zamana bağlı kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü için, söz konusu bu denklemlerin uzayda ve zamanda ayırıklaştırılması gerekmektedir. Ayırıklaştırma yöntemi olarak bu çalışmada Sonlu Hacimler Yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemin uygulanmasında ele alınan kontrol hacimlerinin temsili gösterimi Şekil 2.3'te gösterilmektedir.

Akış, ısı ve kütle geçişi denklemlerinin ayırıklaştırılması için günümüzde en çok kullanılan yöntemlerden birisi olan sonlu hacimler yönteminde, çözümlemesi yapılacak hacim, sonlu sayıda küçük kontrol hacimlerine bölünmektedir. Bahsedilen her bir diferansiyel denklem, öncelikle karşılık gelen integral gösterimleri ile yazılmakta, daha sonra her bir kontrol hacmi için söz konusu integral ifade çözülmektedir. Bu yöntemin avantajı, her bir kontrol hacmi için ayrı ayrı korunum denklemlerini ve sürekliliği her zaman sağlamasıdır [62].

Ele alınan diferansiyel denklemlerin ayırıklaştırılmasında atılan ilk adım, denklemin her iki tarafının da hem uzayda hem de zaman boyunca integralinin alınmasıdır. Bu işlemten sonra ise ele edilen denklem üzerinde Gauss Teoremi uygulanmaktadır.

$$\iiint_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{F}) dV = \oiint_S (\vec{F} \cdot \vec{n}) dS \quad (2.29)$$

Bu teorem bir kontrol hacmi içerisinde, herhangi bir vektör alanının kontrol hacmi içerisindeki toplam değişiminin, söz konusu kontrol hacminin sınırlarından gerçekleşen akıların toplamına eşit olduğunu belirtmektedir. Sonlu Hacimler Yöntemi ile çözülmek istenen korunum denklemlerinin ayırıklaştırılmasında, Gauss Teoremi önemli bir adımı oluşturmaktadır [63].

Bu yöntemin adım adım anlatımı için süreklilik denkleminde (Denklem 2.1) faydalanabiliriz.

Diferansiyel ifade ile gösterilen genel kütle korunum (süreklilik) denklemi, sonsuz küçük bir kontrol hacmi için geçerlidir. Oysaki benzetimi yapılacak geometri, boyutları belirli ve tanımlı kontrol hacimleri üzerinden çözülecektir. Sonlu büyüklükte kontrol hacimleri ile yapılan çalışmalarda, kullanılan denklemler diferansiyel formda

değil, integral formlarında kullanılmalıdır. Bu durum yalnızca geometrinin değil, aynı zaman da denklemlerinde ayrıklaştırılmasının zorunlu olduğunu göstermektedir.

$$\int_t \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV dt + \int_t \int_V \nabla \cdot (\rho \vec{u}) dV dt = \int_t \int_V \dot{S}_m''' dV dt \quad (2.30)$$

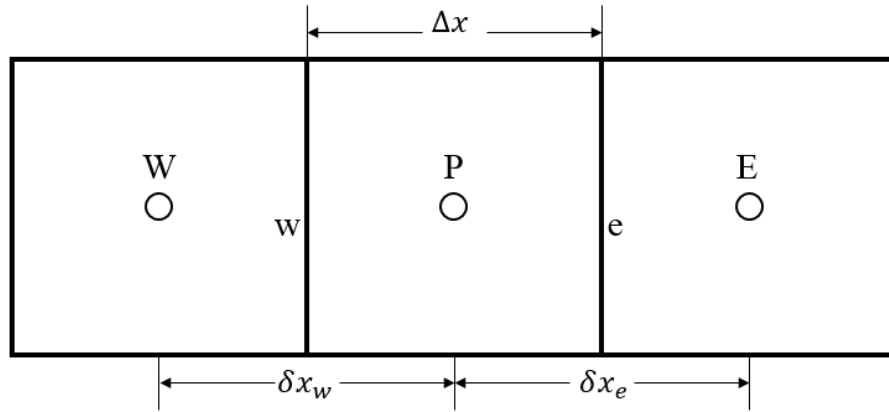
Denklemin sağ tarafında bulunan ikinci terime, yani taşınım terimine Gauss Teoremi uygulanacak olursa, denklem 2.31 elde edilir.

$$\int_t \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV dt + \int_t \int_S \rho \vec{u} \cdot \vec{n} dS dt = \int_t \int_V \dot{S}_m''' dV dt \quad (2.31)$$

Bu noktaya kadar herhangi bir varsayımda bulunulmadan gelindi. Denklem buradan sonra, kullanılacak kontrol hacimlerinin özellikleri göz önüne alınarak kurgulanmaya devam edilecek.

Denklemlerin ayrıklaştırılmasında yapılacak ilk yaklaşımlar şu şekildedir:

- Kontrol hacmi *içerisinde* her noktada özellikler aynıdır [62].
- Kontrol hacminin *yüzeyleri üzerinde* her noktada özellikler aynıdır [62].



Şekil 2.3: Sonlu hacimler yöntemine göre kontrol hacmi.

Bu iki varsayım sayesinde kontrol hacminin içerisindeki ve yüzeyindeki özellikleri yalnızca birer noktada ile ifade etmek yeterli hale gelmektedir. Bu varsayım doğrultusunda hacim ve yüzey integralleri alınır ise

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \Delta V) \right] dt + \int_t^{t+\Delta t} \left[\sum_f (\rho \vec{u} \cdot \vec{n} A)_f \right] dt = \int_t^{t+\Delta t} [\dot{S}_m''' \Delta V] dt \quad (2.32)$$

sonucu karşımıza çıkmaktadır.

Bir sonraki adım, zaman integralinin alınmasıdır. Burada, denklemin ilk terimi için herhangi bir sorun çıkmamaktadır. Fakat ayrıklaştırılmış bir zaman sistemi içerisinde çalışıldığı için, diğer terimlerin zaman içerisinde nasıl bir karakter izlediklerini belirten bir profil belirlemek gereklidir. Genel anlamı ile yukarıdaki ifade şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned} \frac{(\rho\Delta V)^1 - (\rho\Delta V)^0}{\Delta t} + \gamma \left[\sum_f (\rho \vec{u} \cdot \vec{n} A)_f \right]^1 + (1 - \gamma) \left[\sum_f (\rho \vec{u} \cdot \vec{n} A)_f \right]^0 \\ = \gamma (\dot{S}_m''' \Delta V)^1 + (1 - \gamma) (\dot{S}_m''' \Delta V)^0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

Yukarıdaki ifadede 1 üst indisi ile $t + \Delta t$ zamanındaki, 0 ile ise t zamanındaki değerler ifade edilmektedir. Görülebileceği gibi daha önce bahsedilen profil tanımlaması γ faktörü ile yapılmaktadır. $\gamma = 0$ ise yöntem *AÇIK* (Explicit), $\gamma = 1$ ise yöntem *TAM KAPALI* (Fully Implicit) olarak tanımlanmaktadır. Eğer bu değer 0,5 olarak alınacak olursa, yöntem *Crank-Nicolson Yöntemi* olarak adlandırılır. Crank-Nicolson yöntemi zamanda ikinci derece doğruluğu olan bir yöntem olmasına rağmen Patankar (1979) tarafından açık yöntemde olduğu gibi bu yöntemin de fiziksel tutarlılık gösterebilmesi için zaman adımının seçiminde bir takım limitlemelerin olduğu ve bu limitlere uyulmadığı durumlarda fiziksel olarak doğruluğu olmayan sonuçlar çıkabildiği belirtilmektedir. Bu nedenle geliştirilen çözüm yönteminde tam kapalı denklem takımı kullanılmıştır ($\gamma = 1$) [62].

Kolaylık sağlaması nedeni ile bilinmeyen zamanı belirtmek için kullanılan üst indis ‘1’ yazımdan düşürülür ise denklemin en son durumu şu şekildedir:

$$\frac{(\rho\Delta V) - (\rho\Delta V)^0}{\Delta t} + \sum_f (\rho \vec{u} \cdot \vec{n} A)_f = \dot{S}_m''' \Delta V \quad (2.34)$$

Bu noktadan sonra elde edilen denklem, seçilen kontrol hacimlerine uygulanabilir. Burada dikkat edilirse yüzey normallerinin ve hız vektörlerinin hesabı bulunmaktadır. Aynı zamanda söz konusu denklem üç boyutta yazılan formunu halen korumaktadır.

Kurgulaması yapılan modelde gazlaştırma kanalının ve kömür bloğunun silindirik olduğu kabul edilmiştir. Buna uygun olarak kontrol hacimleri de silindirik koordinatlarda oluşturulmuştur. Kontrol hacimlerinin yüzey normalleri, koordinat

düzlemi ile paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Böylece $\vec{u} \cdot \vec{n}$ skaler çarpımının hesaplanması kolaylaştırılmıştır. Ayrıca gazlaştırma kanalının (yalnızca z yönünde) tek boyutlu karakterde olduğu kabul edilmiştir. Böylece denklem 2.34 sadeleşerek 2.35 haline dönüşmektedir.

$$\frac{(\rho\Delta V) - (\rho\Delta V)^0}{\Delta t} + (\rho u A)_w - (\rho u A)_e = \dot{S}_m''' \Delta V \quad (2.35)$$

Dikkat edilecek olursa, denklem 2.35 içerisinde kontrol hacmi merkezinin değerinin yanı sıra kontrol hacimleri arasındaki yüzey alanlarında tanımlanmış değerlerin yani bir diğer deyişle kontrol hacmi sınırlarında meydana gelen akı değerlerinin de bulunduğunu görürüz. Oysaki ayrıklaştırma işleminin başlangıcında verilerin yalnızca kontrol hacmi merkezleri için tutulacağı belirtilmiştir. Bu durum, yüzey değerleri için bir yaklaşımda bulunulması gerekliliğini doğurmaktadır. Patankar (1980) tarafından belirtildiği gibi, akış hızına bağlı taşınımın, difüzyon hızına göre daha büyük olduğu durumlarda ($Pe > 2$) yüzey değerleri, akışın geldiği yöndeki kontrol hacmi için tanımlanan değere oldukça yakındır [62]. Bu bilgi ışığında yapılabilecek ilk varsayım, yüzey değerlerinin, akışın geldiği yönde bulunan kontrol hacmi değerlerine eşit olduğudur. Bu tarz bir yaklaşım ‘birinci derece geri fark’ yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Kurgulanmakta olan modelde, akışın her zaman ve her noktada girişten çıkışa doğru tek taraflı gerçekleştiği düşünülür ise, denklem 2.36 elde edilir.

$$\frac{(\rho\Delta V)_P - (\rho\Delta V)_P^0}{\Delta t} + \rho_W(uA)_w - \rho_P(uA)_e = \dot{S}_m''' \Delta V \quad (2.36)$$

Yapılan modelleme çalışmalarında, yalnızca akış hızları bir istisna olarak kontrol hacmi merkezlerinde değil, kontrol hacmi sınırlarında tanımlanmıştır. Bu varsayımın çok basit bir nedeni vardır: denklemlerde hız terimleri yalnızca kontrol hacmi sınırları için yazılmış terimlerde bulunmaktadır. Bu nedenle hız verilerinin de sınırlarda tanımlanması, hacim merkezlerinde tanımlanmasına göre daha pratik bir kullanım sağlamak ve daha fazladan bir varsayım yapılmasını engelleyerek daha doğru bir sonuç elde edilmesini sağlamaktadır.

Kontrol hacmi için yazılmış, modellemede kullanılan diğer tüm diferansiyel denklemler, yine aynı yöntem ile aynı adımlar takip edilerek kolayca ayrıklaştırılabilmektedir. Yukarıda gösterilen çıkarımda olası bir difüzyon teriminin

ayrıklaştırılmasına değinilmemiştir. Anlatılan yönteme sadık kalınarak yapılan bir ayrıklaştırma sonucunda herhangi bir skalerin difüzyonu:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[-\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] \Rightarrow \Gamma_e \frac{\phi_P - \phi_E}{\Delta x} + \Gamma_w \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x} \quad (2.37)$$

 eklinde ayrıklaştırılmaktadır [63].

2.6.2 Sayısal  z m yöntemi

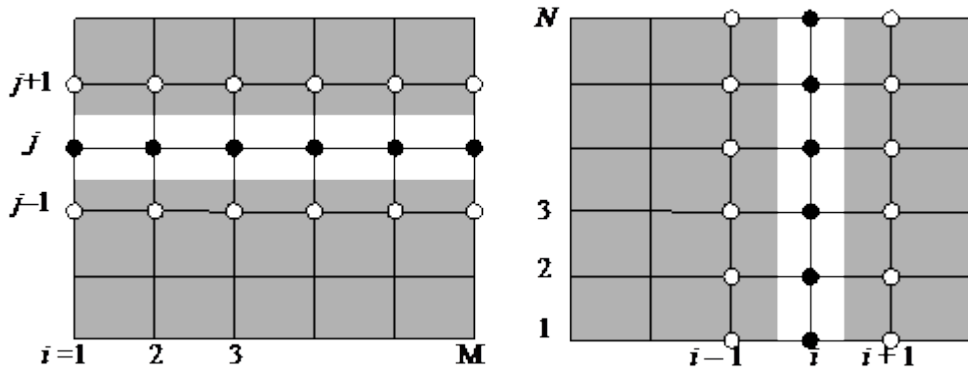
Bir  nceki bölümde ayrıklaştırılan denklemler sonucu her bir denklem birbirlerine bağlı cebirsel bir denklem takımı elde edilmektedir. Bu cebirsel denklem takımları çoğu zaman alışılagelmiş matris  z m yöntemleri ile  z lelebilmektedir. Fakat bu yöntemler çoğu zaman oluşan denklemlerin  z m  basitleştirici bir takım özelliklerini ( rneğin   l  bant matris yapısını) göz ardı etmekte ve işlemsel olarak verimli olmamaktadırlar. Bunun yanı sıra, söz konusu denklemler incelendiğinde her bir denklemin birbirinden etkilendikleri (birbirlerine bağlı oldukları) ve tüm bu denklemlerin aynı anda üzülmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Doğrusal olmayan denklem takımlarının üzümlerinde iteratif yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler,  z me tahmini bir değer ile başlamakta, daha sonra yinelenen hesaplama adımlarının tekrarlanması ile adım adım  z me ulaşmaktadırlar.

Daha önce bahsedilen korunum denklemlerinin ayrıklaştırılması sonucunda ortaya çıkan cebirsel ifadelerde, herhangi bir kontrol hacmi için eğer denklem bir boyutlu ise üç, denklem iki boyutlu ise beş adet bilinmeyen bulunmaktadır. Bu bilinmeyenlerin dışında kalan ve diğer  z m  yapılan özellikler (yoğunluk, sıcaklık, vb.) ise ‘tahmin edilen’ değerler olarak ele alınmaktadır. Üç adet bilinmeyeni olan cebirsel denklemlerin her bir kontrol hacmi için yazılması sonucunda ortaya çıkan sistem,   l  bant matrisler oluşurmaktadır. Bu tür matrislerin  z m ,   l  bant matris algoritması (TDMA) ile etkili bir şekilde yapılabilmektedir [64].

Yalnızca bir boyutlu denklemler için TDMA’nın kullanılması yeterli olmaktadır. Ancak denklemin boyut sayısı artar ise, bilinmeyen sayısı da artmaktadır. Bu nedenle TDMA kullanılamaz hale gelir. Bu duruma bir  z m olarak Satır-Satır (Line-by-Line) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, beş adet bilinmeyenden, aynı doğrultuda olan iki tanesi ‘tahmin edilen’ değerleri ile kullanılmaktadır. Böylece TDMA algoritmasını kullanmak yeniden mümkün hale gelir. Ancak bu şekilde bir  z m, her

seferinde ancak bir adet satırı çözmektedir. Bir satırın çözümü yapıldıktan sonra, ‘tahmin edilen’ olarak seçilen bilinmeyenler doğrultusunda bir sonraki satıra geçilir. Böylece iki boyutlu bir geometride bir doğrultu boyunca doğrudan çözüm sağlanmakta, diğer doğrultuda ise Gauss-Seidel iterasyonuna benzer bir şekilde tarama yapılmaktadır [63,64]. Yöntemin yakınsama hızını arttırmak için tarama doğrultusunun ve yönünün değiştirilmesi tavsiye edilmektedir. Böylece Gauss-Seidel iterasyonunun sahip olduğu dezavantajın aksine, her iki doğrultudan ve yönden sınır şartlarının etkisi TDMA sayesinde hızlıca etki edebilmektedir. Yöntem Şekil 2.4’te görselleştirilmiştir. Buradan görüleceği üzere öncelikle TDMA x yönünde uygulanır iken (siyah noktalar), beyaz ile gösterilen noktalardaki çözüm ‘tahmin edilen’ değerleri ile kullanılmakta, daha sonra TDMA’nın uygulandığı satır y yönünde hareket etmektedir. Bu doğrultuda yapılan tarama sonuçlandıktan sonra, tarama doğrultusu değiştirilmektedir. Bu durumda ise TDMA, y ekseninde uygulanırken, tarama x ekseninde gerçekleşmektedir.



Şekil 2.4: Satır-Satır yönteminin uygulaması.

Daha önce de bahsedildiği gibi her bir korunum denklemi ve ek değişkenler, birbirlerini etkilemektedirler. Fakat çözüm yöntemi her seferinde ancak tek bir denklemi çözmektedir. Bu çözüm sırasında diğer denklemlerin etkisi yalnızca ‘tahmin edildiği’ ve diğer denklemlerin, çözümü yapılan denklemin değişimlerine vereceği tepki bilinmediği için her bir iterasyon adımı sonrasında bulunan değerlerin, diğer denklemlerin çözümünde direkt olarak kullanılması, çözümün kararlılığına olumsuz etki edebilmektedir. Özellikle kimyasal tepkimelerin olduğu sistemlerde bu duruma daha da fazla dikkat edilmelidir. Bu sebeple ısı, kütle transferi ve akış hesaplamalarında oldukça sık kullanılmakta olan ‘rahatlatma faktörü’ (underrelaxation parameter) bu çalışma için hazırlanan sayısal çözüm yöntemine de dâhil edilmiştir. Rahatlatma faktörü, her bir iteratif çözüm adımının sonucunda elde edilen değerlerin,

bir önceki hesaplanmış değerleri ile ‘harmanlanarak’ çözüme devam edilmesi prensibine dayanır. Bu şekilde çözüm sırasında ani bir değişimin engellenmesi, salınımların azaltılması ve çözümün kararlılığının artırılması amaçlanmaktadır.

$$\phi^{yeni} = (1 - \omega)\phi^{eski} + \omega\phi^{hesaplanan} \quad (2.38)$$

Rahatlatma faktörü 0 ile 1 arasında seçilmektedir. Bu değer 1 olduğu durumlarda, iterasyonlar sonucu çıkan sonuç herhangi bir tamponlanmaya uğramadan direkt kullanılmaktadır. Bu değer 0 olarak atanması durumunda ise çözüm yerinde sayacak, hiçbir değişim gerçekleşmeyecektir. Denklem 2.38’den de rahatça görülebileceği gibi, rahatlatma faktörünün çok küçük alınması çözümün ilerleyişini gerçek değerine yakınsamasını oldukça yavaşlatabilir. Diğer taraftan 1’e yakın değerler ise çözümde salınımlara yol açabilmekte, çözümün ıraksamasını engellemekte yetersiz kalabilmektedirler. Bu değer seçimi için ideal bir değer hesaplanabilmesi söz konusu değildir ve genellikle problem üzerinde kazanılan tecrübe ile belirlenmektedir [62].

İteratif çözümler her bir adımda gerçek çözüme bir adım daha yaklaşmayı hedeflemektedir. Fakat hiçbir zaman gerçek çözümü tam olarak yakalamak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, çözüme ne kadar yaklaşıldığında elde edilen değerlerin ‘doğru’ değerler olduğuna karar vermek için bir yöntem geliştirilmesi gerekmektedir.

Yakınsamanın sağlanıp sağlanmadığının kontrolü için, hesaplanan değerlerin iki iterasyon adımı arasında ne kadar değiştiği incelenmektedir. Yakınsama kontrolü her kontrol hacmi için ayrı ayrı yapılmaktansa, tüm hacimlerde gerçekleşen değişimlerin karekök ortalaması bulunarak, bu değer değişkenin ortalama değerine bölünmesi ile elde edilen değer ile gerçekleştirilmektedir.

$$R = \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_i^0)^2} \right) \left(\frac{N}{\sum_{i=1}^N \phi_i} \right) \quad (2.39)$$

Yukarıda gösterildiği gibi hesaplanan bağıl artık hata değeri, her çözülen korunum denklemi için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Hesaplanan artık hataların tek tek her biri, tanımlanmış olan yakınsama kriterinden düşük olduğunda ($R < \varepsilon_{yakınsama}$) çözümün yakınsamış olduğu kabul edilmektedir.

2.6.3 Çözüm algoritması

Sayısal çözümün başlangıcında, çözümü yapılacak değerlerin başlangıç değerleri girilir. Bu değerler gaz hacminde sıcaklık için standart oda sıcaklığı, bileşenler için ise hava içerisindeki bileşenlerin molar derişimleridir. Kanal içerisinde gazın giriş hızı, girilen debi değeri ve giriş çapı tarafından kontrol edilmektedir. Katı fazının, tamamen koklaşmış kömürden oluştuğu kabul edilir. Tepkimelerin başlayabilmesi için, katı fazının sıcaklık dağılımı değişken olarak atanmaktadır. Buna göre kömür bloğunun ilk 15 cm'lik bölümünün sıcaklığı 1000°C olarak tespit edilmiştir. Bu sıcaklık tanımlaması, deneysel çalışmalarda gazlaştırma işleminin başlangıcında kömür bloğunun sıcaklığını arttırmak için kömürün yakılmasını işleminin matematiksel olarak benzetimidir.

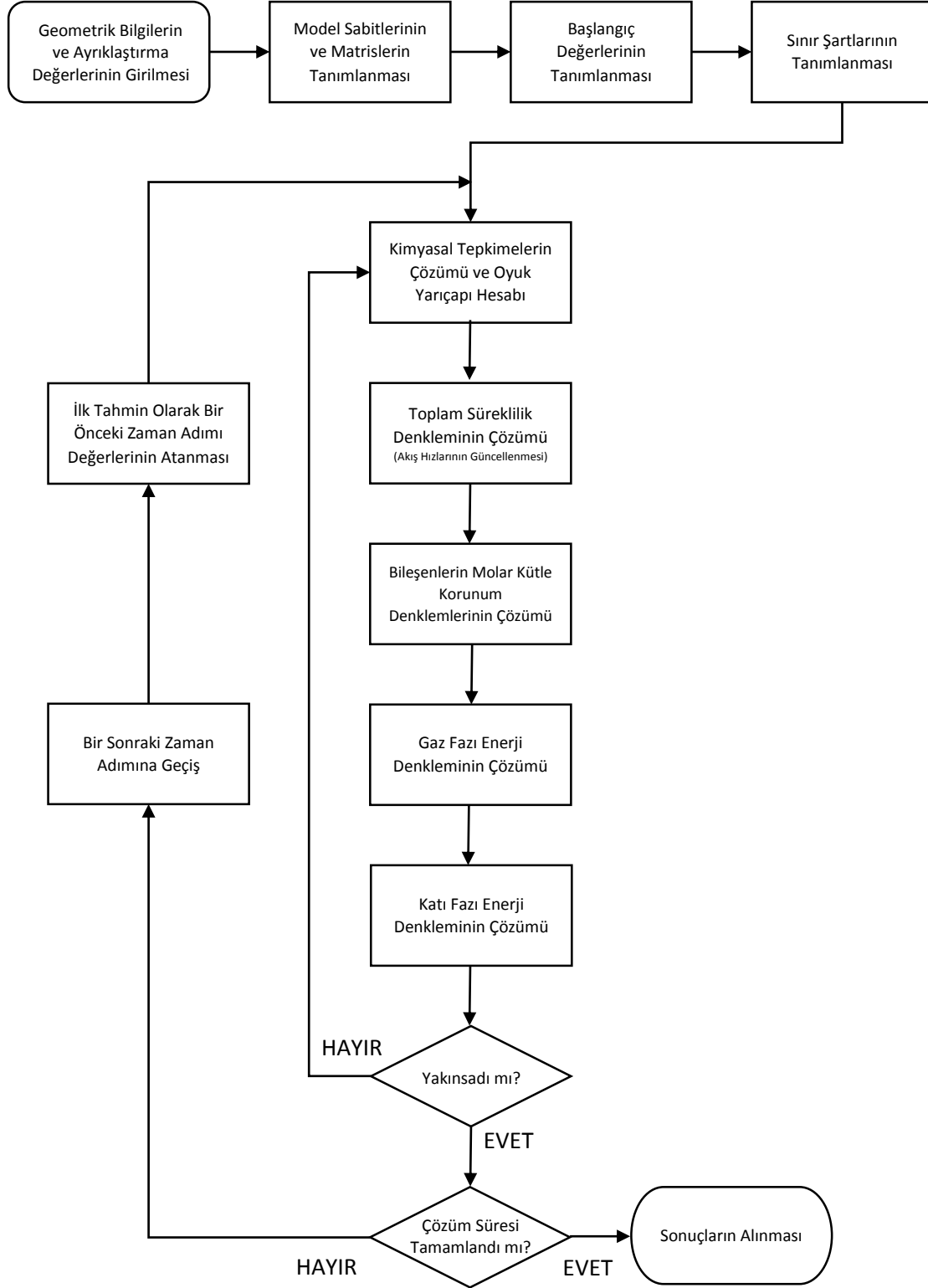
Sayısal çözüm için çözümleme geometrisi boyunca ilk değerlerin atanmasından sonra, ilerleyen zaman için çözümler başlatılır. Her bir zaman adımının çözümü esnasında denklemler, belli bir sıra ile çözülür. Yapılan ilk çözüm, gazlaştırma kanalı içerisinde hızların belirlenmesidir. Gaz fazı için yazılan taşınım denklemleri, içerisinde akış hızına bağlı terimler içermektedir. Bu nedenle ilk olarak hızların hesaplanması önem arz eder. Bir sonraki işlem, gazlaştırma kanalı boyunca her bir kontrol hacminde kimyasal tepkimelerin çözülmesidir. Oyuk yarıçapı hesabı da bu noktada gerçekleştirilmektedir. Tepkime hızlarının belirlenmesi, oyuk yarıçapı artışının hesaplanabilmesi için yeterlidir. Bu işlem sonunda, taşınım denklemlerinde kullanılmak üzere kaynak terimleri üretilmiş olur.

Daha sonra taşınım denklemleri, şu sıra ile çözülür: Her bir bileşenin derişimi, gaz fazı için enerji korunumu ve en son katı fazı için enerji korunumu. Çözülen bu değerler, özellikle sıcaklık değerleri, kimyasal tepkime hızlarını etkilemektedir. Ayrıca heterojen tepkimeleri sonucunda akışa geçen madde miktarının akış hızına etkisi de yeniden hesaplanmalıdır.

Tüm bu döngü hız değerleri, bileşenlerin derişimleri ve gaz ile katı fazının sıcaklık değerleri art arda yapılan iterasyonlarda belli bir bağıl değişim değerinin altında kalınca kadar devam eder. İstenilen bu yakınsama değeri her bir çözülen denklem için sağlandığında, içinde bulunulan zaman adımının çözülmüş olduğu kabul edilir ve bir sonraki zaman adımının çözümüne geçilir. Bir sonraki zaman adımının çözümü için

kullanılan başlangıç değerleri, çözümlenen zaman adımıdaki değerlerdir. Yukarıda anlatılan işleyişi anlatan akış şeması Şekil 2.5'te verilmiştir.

Yukarıda anlatılan denklemleri kullanarak, belirlenen çözüm yöntemi ve işleyişi ile çalışmakta olan, MATLAB dilinde yazılmış bilgisayar programı EK B'de verilmiştir.



Şekil 2.5: Sayısal çözüm algoritması.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yeraltında kömür gazlaştırma sürecinin laboratuvar ölçekli benzetiminin yapılabilmesi ve süreç hakkında daha detaylı bilgi üretilebilmesi amacı ile İstanbul Teknik Üniversitesi yanma laboratuvarında bu ihtiyaçlara cevap verebilecek şekilde bir deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneği, iki farklı kömür bloğu büyüklüğünde ve farklı gazlaştırma ajanı karışımları ile çalışmaya uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.1’de bulunmaktadır.

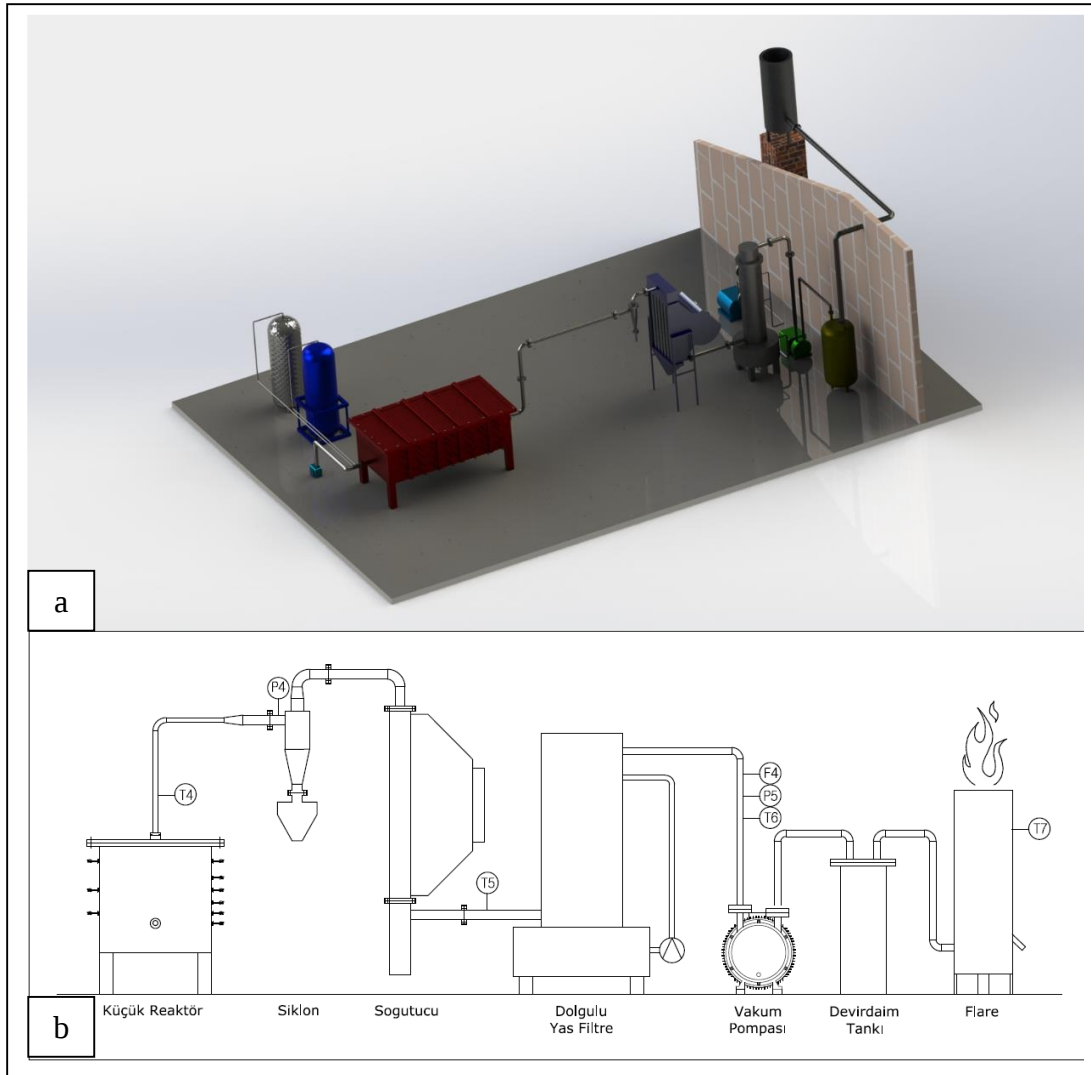
Deney esnasında süreçle ilgili bilgi toplayabilmek için kömür bloğu içerisine birçok ısıtıcı çift yerleştirilmektedir. Bu şekilde deney boyunca kömür bloğu içerisinde gerçekleşen değişimlerle ilgili bir bilgi edinmek mümkün olmaktadır. Elde edilen gaz, deney tesisatı boyunca hareket ederken farklı noktalarda sıcaklık ve basınç ölçümleri yapılmaktadır. Ayrıca sisteme beslenen gazlaştırma ajanlarının ve elde edilen yapay gazın debileri de süreç boyunca kaydedilmektedir.

Deneyleerin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için en az deney düzeneğinin kendisi kadar, deneye hazırlık çalışmalarının da önemi yüksektir. Bu sebepten ötürü her deney öncesi hazırlıklar büyük bir titizlikle, önceden belirlenmiş bir işlem sırasına göre yürütölmektedir.

3.1 Laboratuvar Ölçekli Yeraltı Kömür Gazlaştırma Deney Düzeneği

3.1.1 Tasarım kriterleri

Kurulacak deney düzeneğinin YKG sürecini sağlıklı bir şekilde temsil edebilmesi için sağlanması gereken en önemli kıstas, gazlaşmakta olan kömür bloğunun olabildiğince yalıtımlı (adyabatik) bir ortamda bulunmasıdır. Gazlaştırma deneylerinde kullanılacak reaktörün bu nedenle yüksek ısıtıcı yalıtım özelliğine sahip olması gerekmektedir. Reaktör ayrıca gazlaştırma esnasında çıkılabilecek yüksek sıcaklıklara da dayanıklı olmalıdır. Gazlaştırma işlemi başlatılmadan önce, kömür bloğunun sıcaklığının yükseltilmesi gerekmektedir. Tasarlanan deney düzeneğinin bu ısıtmanın pratik bir şekilde yapılmasına imkân vermesi avantajlı olacaktır.



Şekil 3.1: Deney düzeneği elemanlarının şematik görünümü.

Deneyler boyunca literatürde rastlanan farklı gazlaştırma yöntemlerinin (CRIP, çift kademeli, tamamen oksijen ile, tamamen hava ile vb.) denenmesine olanak sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle gazlaştırıcı besleme düzeneğinin tasarımının da bu farklı taleplere cevap verecek şekilde yapılması gerekir.

Kaynak olarak kömürle çalışılıyor olması, kirlilikle ilgili birkaç konunun da düşünülmesini gerektirmektedir. Bunlardan ilki, kömürün içerisinde bulunan kükürdün, H_2S oluşumuna sebep olmasıdır. Problemlili olan bu maddenin elde edilen yapay gazdan ayrılması gerekmektedir. Kömürün gazlaştırılması sırasında yüksek sıcaklıklarda bol miktarda tar açığa çıkmaktadır. Tar, deney tesisatı boyunca yoğunlaşarak hatta kirliliğe ve tıkanmalara sebep olabilmektedir. Ayrıca süreç boyunca oluşan ve akış ile birlikte taşınabilen katı maddelerin (örneğin kül) tutulması gerekmektedir.

Son olarak elde edilen gazın ve deney sonucunda oluşan diğer artıkların yönetiminin düşünülmesi gereklidir. Bu durumda yapay gazın yakılarak yok edilmesi, oluşan atıkların ise güvenli bir şekilde tahliye edilmesi uygun görülmüştür.

3.1.2 Deney düzeneği ekipmanları

Yukarıda bahsedilen tasarım kriterleri doğrultusunda ve yapılan literatür araştırmasının ışığında deney düzeneğinin tasarımı yapılmıştır. Öncelikle farklı büyüklüklerde kömür blokları ile çalışmaya imkân vermesi açısından iki farklı büyüklükte reaktör kullanılmasına karar verilmiştir. İstenilen gazlaştırma ajanlarının istenilen oranlarda karışımlarının kullanılabilmesine imkân verecek ve CRIP metodu de kullanılabilecek şekilde hareketli bir adet besleme düzeneği tasarlanmıştır.

Reaktör çıkışında gaz içerisindeki kül, kurum ve benzeri katı parçacıkları ayırmak için bir adet döngülü toz tutucu kullanılmaktadır. Gazlaştırma sonucu açığa çıkan gazın sıcaklığının yüksek değerlere çıkması (600°C) beklenmektedir. Bu sıcaklıkta gaz içerisinde tar da bulunabilmektedir. Hem gazı soğutmak hem de tarın hat boyunca yoğunlaşmasını ve kirlilik yapmasını engellemek amacı ile bir adet ısı değiştiricisi kullanılmaktadır. Bu ısı değiştirici ile gazın sıcaklığının oda sıcaklığına kadar düşürülmesi ve oluşan tar ile buharın burada yoğunlaştırularak toplanması amaçlanmıştır.

Bir sonraki adım olarak yapay gazın içerisinde çevreye zararlı olan H_2S 'in arındırılması gelmektedir. Söz konusu işlem için bir adet yıkama kolonu tasarlanmıştır. Bir su pompası yardımı ile kolon içerisinde sürekli olarak bazik bir çözelti ile yıkama yapılmakta, böylece yapay gazın temizlenmesi sağlanmaktadır.

Deney tesisatı boyunca oluşan basınç kayıplarının yenilmesi ve sürekli akışın sağlanması için yıkama kolonundan sonra bir adet vakum pompasının kullanılması uygun görülmüştür. Son olarak elde edilen yapay gaz çevreye zarar vermeyecek şekilde yok edilmek amacı ile yakıcıya gönderilir. Yakıcı aynı zamanda elde edilen yapay gazın yanıcılık özellikleriyle ilgili bir ilk fikir kazanılmasını da sağlamaktadır.

3.1.2.1 Gaz besleme düzeneği

Yeraltında kömür gazlaştırma işlemi ile ilgili yapılan araştırmalar ve deneyler incelendiğinde, kullanılan gazlaştırma ajanlarının debilerinde ve bileşiminde çok geniş bir yelpazede değerler kullanıldığı ortaya çıkmaktadır. Tasarlanan besleme düzeneği

farklı debi ve karışım oranlarını sağlayabilmektedir. Bunun yanı sıra, deneylerin ilerleyen aşamalarında CRIP tekniği üzerinde çalışmaların yapılabilmesi için besleme düzeneği ve besleme hattı hareketli olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.2).

Besleme düzeneği, tekerlekler yardımı ile yeri rahatlıkla değiştirebilen bir platform üzerinde bulunan bir adet oksijen tüpü, bir adet üfleç, bir adet buhar üreticisi ve acil durumlarda reaktör içerisindeki tepkimelerin durdurulması amacı ile hazırda bekletilen bir adet azot tüpünden oluşmaktadır. Tam kapasite ile çalıştıklarında üflecin 20 m³/saat hacimsel debi, buharlaştırıcının ise 5 kg/saat kütleli debi beslemesi yapabilmektedirler.

Besleme düzeneği üzerinde hava, oksijen ve su buharı çıkışlarında basınç, sıcaklık ve debi ölçümleri alınmaktadır. Bunun yanı sıra her bir hat için debi kontrol valfi bulunmaktadır. 4 ayrı hattan gelen bu gazlar şekil değiştirebilen borular yardımı ile kollektöre bağlanmaktadır. Birbirleri ile homojen karışan gazlaştırma gazı, rekorlu bağlantı aracılığı ile reaktörün giriş bölümüne takılmaktadır.



Şekil 3.2: Üfleç, buharlaştırıcı ve oksijen ile azot tüplerinin bulunduğu besleme düzeneği.

Yukarıda anlatılan durumun aksine ilk yapılan çalışmalar esnasında oksijen debisi, oksijen tüpünün çıkışında yer alan basınç regülatörü ile kontrol edilmiştir. Fakat özellikle düşük debiler ile yapılan çalışmalarda söz konusu regülatör tek başına istenilen debilerde sürekli bir akış sağlamakta zorlanmış, oksijen besleme debisinin sürekli yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum, belirli aralıklarla, aksatılmaksızın oksijen debisinin kontrol edilmesini ve regülatörün deney süreci boyunca sürekli yeniden ayarlanmasını gerekli kılmıştır. Karşılaşılan bu soruna çözüm olarak regülatör çıkışında bulunan hortum üzerine bir adet iğne vana yerleştirilmesine karar verilmiştir. Yapılan düzenlemenin fotoğrafı Şekil 3.3'te verilmiştir.

Azot beslemesi için ise bu şekilde bir eklenti yapılmasına gerek görülmemiştir. Azot beslemesi ancak sistemi durdurmak ya da acil durumlarda ihtiyaç duyulan bir özellik olduğu için debi kontrolü kritik bir önem taşımamaktadır.



Şekil 3.3: Oksijen regülatöründen sonra debiyi kontrol etme amaçlı eklenen iğne vana.

3.1.2.2 Reaktörler

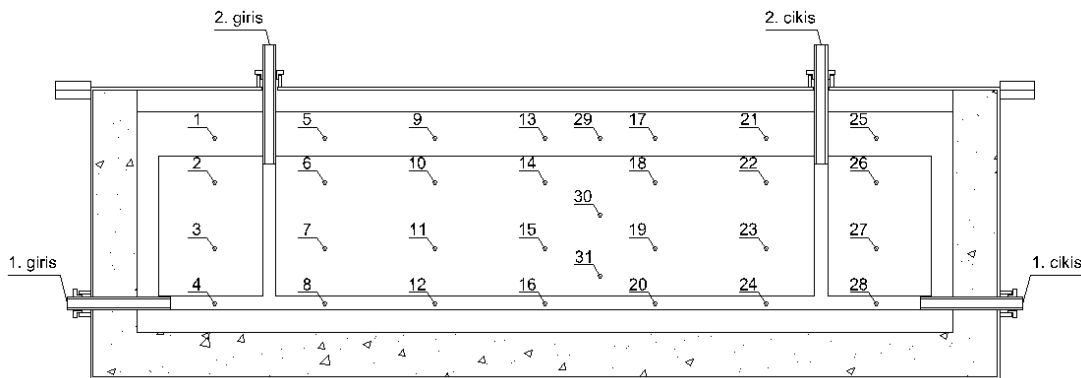
Yapılan literatür araştırması sırasında kömür bloğuna açılan gazlaştırma kanallarının kömür bloğunun üstünden de, yanından da açılabilirdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle her iki reaktörde de gazlaştırma ajanı giriş borularının ve yanıcı yapay gaz çıkış borularının kömür bloğuna yatay ya da dik olarak konumlandırılmasına imkân sağlanacak şekilde bir tasarıma gidilmiştir. Böylece farklı konumda yerleştirilecek giriş-çıkış borusu konumlarının gazlaştırma işlemine etkileri gözlemlenebilecektir. Reaktörün girişi, gazlaştırma ajanlarının girişi için kullanılan esnek borunun rahatça takılıp çıkarılabilmesi için rekorlu bağlantıya sahiptir. Böylece deneyin başlangıcında kömürün ısıtılması için gerekli yanma süreci boyunca alev yakımı tamamlandıktan sonra hızlı bir şekilde gaz beslemesi başlatılabilmektedir.



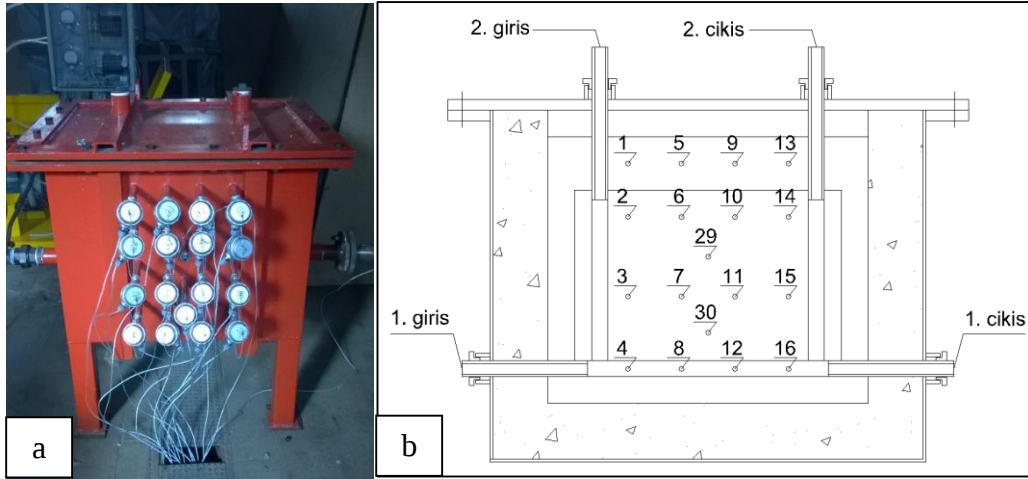
Şekil 3.4: Büyük reaktör.

Daha önceden belirtildiği üzere reaktör tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan bir tanesi de reaktörün ısı yalıtımıdır. Araştırmalar sonucunda reaktör içerisinde sıcaklık yer yer 1300°C 'ye çıkabilse de reaktör genelinde bu değer ortalama 800°C etrafında olduğu varsayılabilir. Bu değer göze alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda reaktörün iç duvarlarına 10 cm kalınlığında ısıya dayanıklı beton ile yalıtım uygulanması uygun bulunmuştur.

Deneylerde farklı kömür bloğu boyutlarında çalışabilmek amacı ile iki farklı reaktör geometrisi tasarlanmıştır. Bunlardan ilki, küçük reaktör, $35 \times 35 \times 50$ cm büyüklüğüne kadar kömür blokları ile çalışmaya olanak verirken, büyük reaktör $70 \times 35 \times 180$ cm büyüklüğünde kömür blokları ile çalışmaya olanak vermektedir. Tasarlanan reaktörler Şekil 3.4 ve Şekil 3.6a'da görülmektedir.



Şekil 3.5: Büyük reaktörün kesit görünümü ve ısıçift noktaları



Şekil 3.6: a) Küçük reaktörün yandan görüntüsü, b) Küçük reaktörün kesit görünümü ve ısıçift noktaları

Reaktörlerin üzerinde ayrıca çok sayıda ısı çift girişi bulunmaktadır. Gazlaştırma süreci boyunca olabildiğince farklı noktadan sıcaklık verisi alınabilmesi amaçlanmıştır. Böylece gazlaştırmanın hangi aşamada olduğu, kömür içerisindeki oyuk gelişiminin nasıl gerçekleştiği gibi konularda bilgi edinmek mümkün olmaktadır. Sıcaklık ölçümünün yapıldığı noktalar büyük reaktör için Şekil 3.5'te, küçük reaktör için ise Şekil 3.6b'de gösterilmiştir.

Deney sonrası yapılan incelemelerde reaktör içerisindeki yalıtım malzemesinin şiştiği ve yer yer yaşanan sinterleşmeler sonucunda kömür, kül ve benzeri malzemelerin reaktör duvarlarına damlacık şeklinde yapıştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yine yapılan incelemelerde, reaktör kapağının iç kısmında paslanma gözlemlenmiştir. Bu paslanmanın, içeride oluşan su buharının kapağın alt kısmında yoğunlaşması ve yüksek oksijen besleme oranı nedeni ile oluştuğu düşünülmektedir. Söz konusu durumların deneylere olumsuz etkisinin olmayacağı düşünülmektedir.

3.1.2.3 Döngülü toz tutucu (Siklon)

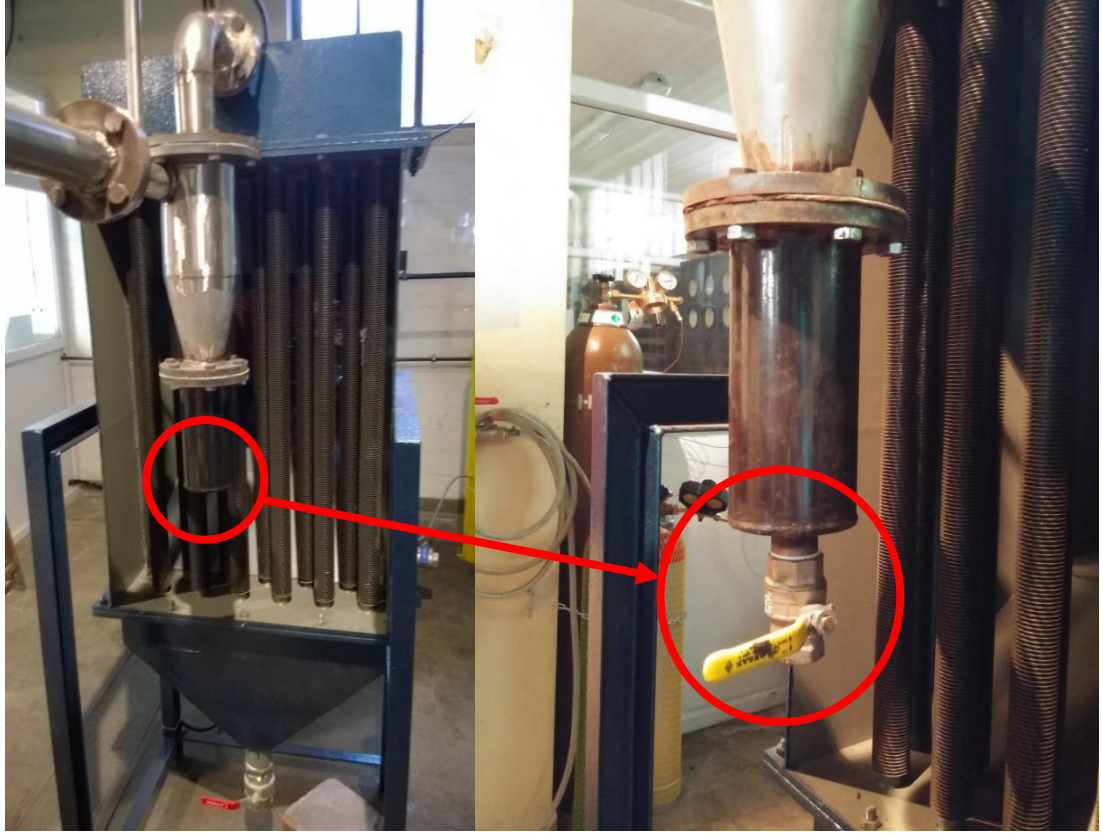
Reaktörden çıkan yapay gaz, içerisinde bir takım katı parçacıklar, tar ve istenmeyen bileşenler (örneğin H_2S) barındırmaktadır. Elde edilen bu gazın direkt olarak analizinin yapılması ve/veya kullanılması uygun değildir. Bu nedenle söz konusu kirliliğin öncelikle temizlenmesi gerekmektedir. Temizlemenin ilk adımı ise katı parçacıkların ayrıştırılması ile sağlanmaktadır. Katı parçacıkların ayrıştırılması için döngülü toz tutucu (siklon) kullanılması uygun bulunmuştur. Döngülü toz tutucular, giren gaz akışının döngülü bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadırlar. Yüksek ataletle sahip katı parçacıklar, bu döngülü akış ile birlikte hareket edemez ve toz

tutucunun duvarlarına çarparak aşağıya düşerler. Döngülü toz tutucunun alt kısmı koni şeklindedir. Böylece akış gittikçe azalan bir yarıçap karşısında daha da hızlanır. Söz konusu akış hızlanması nedeni ile gittikçe daha küçük katı parçacıkları da ayrılırlar. Katı parçacıklardan arınmış gaz, geometrinin ortasından yukarı çıkarak tesisat boyunca ilerlemeye devam ederken, katı parçacıklar ise aşağıda bulunan toplama kabında birikirler. Şekil 3.7’de toz tutucu ve soğutucu birlikte görülmektedirler.

Yapılan deneme ve deneyler esnasında, siklonun altında bulunan haznede yüksek oranda yoğunlaşma gerçekleştiği ve haznenin tamamen dolduğu görülmüştür. Bu durumun siklonun çalışmasına olumsuz yönde etki edebileceğinden şüphelenilmiştir. Ayrıca temizlik esnasında haznenin yerinden çıkarılması için flanşların açılması gerekliliği ile haznenin tamamen dolu oluşu birer zorluk yaşatmıştır. Yukarıda anlatılan nedenler dolayısı ile siklon haznesinin altına bir adet küresel vana eklenmiştir. Deney esnasında ve sonrasında, haznede toplanan suyun ve tarın sistemden uzaklaştırılmasının bu vana aracılığı ile yapılmasına karar verilmiştir. Yapılan değişiklik Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Siklon ve arkasında soğutucunun montaj halinde görünümü.

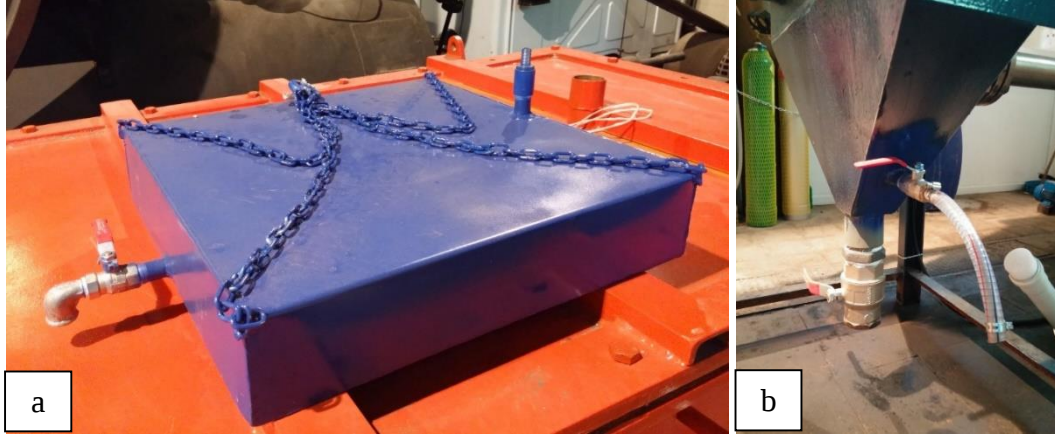


Şekil 3.8: Siklonun biriktirme tankına eklenen boşaltma vanası.

3.1.2.4 Soğutucu

Katı parçacıkların gazdan ayrıştırıldıktan sonraki adım, gazın içerisinde bulunan tarın alınmasıdır. Bu nedenle bir adet ısı değiştiricisi kullanılmıştır. Burada gaz soğutularak yapay gazın içerisinde bulunan su buharı ve katranın soğutucuda yoğunlaştırılması amaçlanmaktadır. Herhangi bir tıkanma yaşanmaması ve yoğunlaşan maddelerin rahatça akabilmeleri için ısı değiştirici boruları dikey şekilde yerleştirilmişlerdir. Bu yerleşim, deneyler sonrası ısı değiştirici borularının temizlenmesini de kolaylaştıracaktır. Yoğuşan maddeler soğutucunun aşağısında bulunan toplama kabında birikmektedirler.

Siklonda da olduğu gibi, yapılan deney ve denemelerde, soğutucunun altında bulunan toplama kabında daha önceden öngörüldüğü şekilde yüksek miktarlarda yoğunlaşma gerçekleşmiştir. Soğutucuda yoğunlaşan suyun ve tarın toplandığı yerden alınabilmesi için fazladan bir adet vana daha eklenmiş, bu vana aracılığı ile alınan örneğin koyulacağı gezici bir kap (biriktirme kabı) imal edilmiş ve bu kabın ağırlığını ölçecek şekilde yük hücresi montajının yapılması için girişimlerde bulunulmuştur. Böylece YKG süreci ve tar oluşumu ile ilgili daha ayrıntılı bilgi toplanılması mümkün olacaktır. Yapılan eklentiler Şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.9: a) Biriktirme tankı. b) Soğutucudan biriktirme tankına ilave bağlantı.

3.1.2.5 Yıkama kolonu (Dolgulu yaş filtre)

Yapay gazın temizlenmesi sırasında bir sonraki adım ise içerisindeki H_2S 'in uzaklaştırılmasıdır. Yıkama kolonu içerisinde H_2S 'in tutulması amacı ile su içerisine bir miktar kostik (NaOH) karıştırılarak, bazik bir karışım elde edilmektedir. Bu karışım püskürtücüler sayesinde kolon içerisinde yağmurlama yapılır. Karışım içerisindeki kostiğin H_2S ile tepkimeye girmesi sonucunda, karışımın bazikliği zamanla azalmaktadır.

Bu tepkime gazın sıvı damlacıklar ile temasını gerektirdiği için suyun yüzey alanının olabildiğince artırılması daha verimli bir yıkama anlamına gelmektedir. Yüzey alanı artışı, iki şekilde sağlanmaktadır. Bunlardan ilki, suyun ince damlacıklar halinde yayan püskürtücülerdir. İkincisi ile kolonun iç hacmini Raschig halkaları ile doldurmaktır. Bu halkalar çeşitli malzemelerden (metal, polimer vb.) üretilebilir ve genellikle silindirik geometridedir. Halkalar hem akışa direnç oluşturmayacak hem de yüzey temas alanını arttıracak biçimde şekillendirilirler.

Deneyler sırasında yıkama kolonu içerisindeki pH değerinin hızlı bir şekilde düşebildiği gözlemlenmiştir. Bu durum yıkama kolonu içerisinde döndürülen yıkama suyunun pH'ının yaklaşık olarak 30 dakikada bir kontrol edilmesini zorunlu kılmıştır. Karışımın bazik özelliğini kaybettiği durumlarda ($pH < 8-9$) sisteme kostik beslemesi yapılması gerekir. Bu besleme, yıkama kolonun yanında bulunan su tankından yapılmaktadır. Besleme yapılmadan önce yıkama kolonunda birikmiş ve bazikliği azalmış karışımın bir bölümü su tankına geri alınmaktadır. Burada kostik eklenen ve bazikliği arttırılan karışım, sonrasında yıkama kolonunun içerisine gönderilmektedir. Şekil 3.10'da yıkama kolonu gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Yıkama kolonu.

3.1.2.6 Vakum pompası

Yukarıda anlatılan sistemler, gaz hattı boyunca basınç kayıplarına neden olmaktadır. Yaşanan basınç kayıplarını yenebilmek için yıkama kolonundan sonra tesisat üzerine bir adet vakum pompası yerleştirilmesine karar verilmiştir. Bu şekilde hat boyunca sürekli ve düzenli bir akış elde edilebilecektir. Ayrıca deneyin ilk aşaması olan yakma ile kömür sıcaklığının yükseltildiği zamanlarda, besleme düzeneği devre dışı kalmaktadır. Bu durumlarda reaktör içerisine doğru akışın sağlanmasının tek yolu tesisatın negatif basınca alınmasıdır. Böylece reaktör içerisine dışarıdan taze hava gelebilmekte, yakıcılar ile sağlanan alev gazlaştırma kanalına doğru ilerleyebilmektedir.

Vakum pompası, SCADA sistemi üzerinden kontrol edilmektedir. Kontrol sistemi üzerinden vakum pompasının çalışma frekansı değiştirilebilmektedir. Yapılan çalışmalarda, vakum pompası çalışma frekansının düzeneğin üzerinde büyük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Frekansın gerekenden düşük seviyelerde kalması, düzeneğin içerisindeki basıncın artmasına neden olmakta, bu basınç artışı ise bağlantı

noktalarından sızıntılara sebebiyet verebilmektedir. Yüksek frekans değerleri ise tesisat içerisinde vakuma sebep olmaktadır ve sonuç olarak bağlantı noktalarından tesisatın (ya da reaktörün) içerisine ortamdan taze hava girmesine neden olabilir.

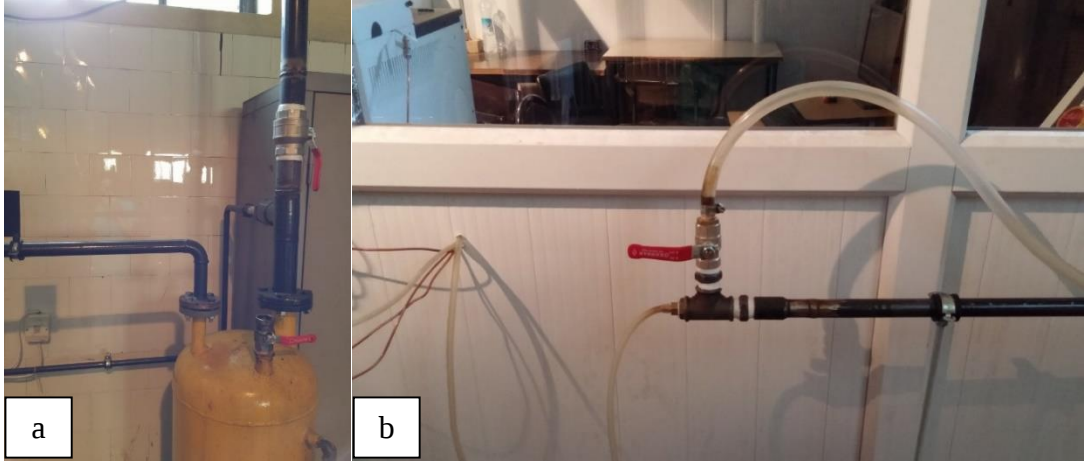
Bu nedenler dolayısı ile tesisat üzerinde bulunan P4 ve P5 basınçölçerlerinin sıfır gösterge basıncında tutulmaları deney sürecinin sağlıklı işlemesi için önemlidir. Vakum basıncının ayarlanması, vakum pompasının çalışma frekansının değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. Fakat her deneyin şartları farklı olduğu için (besleme debileri, kanal yarıçapı ve şekli, kömür boyutları vb.) tüm deneylerde, deney boyunca sürekli olarak kullanılabilecek tek bir frekans değeri yoktur. Frekansın belirlenmesi P4 ve P5 basınçölçerlerinden gelen basınç verilerine göre yapılmaktadır. Ayrıca gaz kromatografi cihazına örnek alınmak istenildiğinde, sistemde istenmeyen basınç artışları yaşanabilmektedir.

Yukarıda sayılan etmenler göz önüne alındığında, vakum pompası frekansını dinamik bir şekilde P4 ve P5 basınç değerlerine göre düzeltilmesini sağlayacak bir kontrol mekanizmasının SCADA sistemine eklenmesi düşünülmektedir. Bu sistem olağan dışı durumlarda kontrolün yeniden deneyi yürüten bireyler tarafından sağlanmasına imkân verecek şekilde devreden çıkabilmeli olmalıdır.

3.1.2.7 Gaz kromatografi örnek alma hattı

Deney sırasında açığa çıkan yapay gazın bileşiminin belirlenmesi için kullanılan gaz kromatografi (GC) cihazı kullanılmaktadır. Gaz kromatografi sisteminde incelenecek örnek, yapay gaz yakıcıya (Flare) gitmeden önce alınır. Burada vakum pompasına ait su tankından sonra 1/2'' çaplı boru ile hat ayrılmıştır (Şekil 3.11a). Ayrılan bu hat yaklaşık 4 metre uzunluğunda olup hattın çıkışında plastik hortum bağlantısı ile yapay gazın temizlenmesi amaçlı cam tüpe bağlanmıştır. Burada cam tüp, tedbir amaçlı kullanılıyor olup, yapılan deneylerde yapay gazın kirliliğine dair herhangi bir bulgu gözlemlenmemiştir. Gerekli görüldüğü durumda nem ve kirlilik tutmak için yedek cam tüp bulunmaktadır. Şekil 3.12b'de görülen vana sistemi ile örnekleme yapılmadan önce boru içerisinde kalan güncel olmayan yapay gazın tahliyesi gerçekleştirilir.

Gaz kromatografi için örnek alınmak istenildiğinde kimi zaman yeterli akış sağlanamayabilmektedir. Bu gibi durumlarda gaz yakıcıya giden hat kapatılmaktadır. Ayrıca vakum pompasının frekansı arttırılarak örnekleme hattında akışın sağlanması da uygulanan, karşılaşılabilen bir durumdur.



Şekil 3.11: a) Su tankı çıkışında yakıcı ve GC hatlarının ayrılması. b) GC öncesi tahliye hattı.

3.1.2.8 Yakıcı (Flare)

Deneyler sırasında elde edilen yapay gaz yanıcı özellikte olduğu ve içerisinde zehirli gazlar barındırdığı için bu gazın güvenli bir şekilde depolanması ya da imha edilmesi gerekmektedir. Gazın imhası için bir adet yakıcı kullanılması uygun bulunmuştur. Yapay gaz, laboratuvarın dışında bulunan yakıcıda yakılarak imha edilmektedir.

Yakıcı, deney düzeneğinin kurulu olduğu laboratuvarın dışında, açık havada durmaktadır. Yakıcı üzerinde bir adet pilot alevi sürekli yanar durumda bırakılmaktadır. Böylece yapay gaz kendi kendine yanmayı devam ettiremiyor olsa bile içerisinde bulunan yanıcı gazların yandığından emin olunmaktadır. Yakıcı içerisinde bulunan bir adet sıcaklıkölçer sayesinde SCADA sistemi üzerinden pilot alevinin yanıyor olduğu sürekli kontrol edilmektedir.

Normal çalışma şartlarında, elde edilen yapay gazın yakıcıda sürekli bir alev oluşturması beklenmektedir. Alevin büyüklüğüne, rengine ve kararlılığına göre elde edilen yapay gazın kalitesi ile ilgili görsel olarak bir fikir sahibi olmak mümkündür.

3.1.3 Ölçme sistemleri

Deney düzeneği üzerinde farklı noktalarda hacimsel debi, sıcaklık ve basıncın ölçülmesi için çeşitli ölçüm aletleri kullanılmıştır. Bu aletlerin türleri, modelleri, SCADA sisteminde kayıtlı isimleri ve kullanım alanları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bunun yanı sıra farklı tür ölçüm aletlerinin ölçüm aralıkları, oluşturdukları analog sinyal ve ölçüm hassasiyetleri ise Çizelge 3.2’de mevcuttur.

Çizelge 3.1: Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm aletleri.

Ölçülen Fiziksel Özellik	Ölçüm Aletinin Türü	Ölçüm Aletinin Tipi/Modeli	Ölçüm Sisteminde Kayıtlı Cihaz	Deney Düzeneğinde Kullanıldığı Yer
Sıcaklık	Isıl çift	K Tipi	Tr1-38, T4, T7	Reaktör İçerisi, Reaktör Çıkışı ve Yakıcı
Sıcaklık	Direnç termometresi	PT100	T1, T2, T3, T5, T6	Deney Tesisi Üzerindeki Diğer Konumlar
Mutlak Basınç	Piezodirenç Transmitteri	Keller PAA-21Y	P1-5, BB	Tesisat Üzerinde, Besleme Bağlantılarında ve Buhar Üreticinde
Fark Basıncı	Elektromanyetik Transmitter	Dwyer MS-331	F1-4	Besleme Bağlantılarında ve Vakum Pompası Çıkışında

3.1.3.1 Sıcaklık ölçümü

Yeraltında kömür gazlaştırma sürecinin takibi açısından en önemli fiziksel özellik sıcaklıktır. Özellikle reaktör içerisinde; kömür bloğunda, yalıtım içerisinde, gazlaştırma kanalında ve reaktör çıkışında sıcaklıkların zaman ile değişimi takip edilmesi gereken önemli birer bilgi kaynağıdır. Çalışma şartlarına ve sıcaklık aralığına göre sistem üzerinde birkaç farklı ısı çifti kullanılmıştır. Tesisat üzerinde kullanılan ısı çiftlerinin ölçüm aralıkları ve hassasiyetleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Sıcaklık ölçümü deney sisteminde dört farklı amaç ile yapılmaktadır. Bunlardan ilki reaktör içerisinde sıcaklık dağılımının tespiti. Küçük reaktörde 20 farklı, büyük reaktörde ise 38 farklı noktadan sıcaklık ölçümü alınabilmektedir. Bu neden ile tam kapasite ile çalıştırıldığında, yalnızca reaktör içerisinde 38 adet sıcaklık ölçer kullanılacaktır.

Sıcaklık ölçümü ayrıca besleme hattı üzerinde ve yapay gaz çıkışında orifisler ile birlikte kullanılmaktadır. Burada alınan ölçümler, hat içerisindeki gazın termodinamik halinin belirlenmesinde kullanılır. Bu işlemde debi ölçümü kısmında yeniden bahsedilecektir.

Yapay gazın sıcaklığı deney düzeneği boyunca da izlenmek istenmektedir. Bu amaç ile kullan iki sıcaklık ölçerlerden ilki reaktör çıkışına yerleştirilmiştir. Elde edilen yapay gazın reaktörden çıkış sıcaklığı, deney aşamalarının takibi için önemli bir parametre teşkil etmektedir. Hat üzerindeki diğer sıcaklık ölçer ise soğutucu çıkışındadır. Bu sıcaklık verisi ile soğutucunun istenilen kapasitede çalışıp çalışmadığı görülmektedir.

Çizelge 3.2: Kullanılan farklı tip ölçüm aletlerinin kapasiteleri.

Ölçülen Fiziksel Özellik	Ölçüm Aletinin Türü	Ölçüm Aletinin Tipi/Modeli	Sinyal Çıkışı	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
Sıcaklık	Isıl çift	K Tipi	0-50 mV	0 – 1200 °C	± 2,5 [°C]
Sıcaklık	Direnç termometresi	PT100	60-212 Ohm	-100 – 300 °C	± 1,0 [°C]
Mutlak Basınç	Piezodirenç Transmitteri	Keller PAA-21Y	4-40 mA	0 - 4 bar (mutlak)	± 0,1 [bar]
Fark Basıncı	Elektromanyetik Transmitter	Dwyer MS-331	0-10 V	0 – 2000 Pa	± 1,0 %

Son olarak da bir adet sıcaklık ölçer, yakıcıda bulunan pilot alevini kontrol etme amaçlı olarak yakıcı içerisine konumlandırılmıştır. Buradan okunan sıcaklık değerlerinde gözlemlenen bir düşüş SCADA sistemi tarafından belirlenmekte de pilot alevinin sönüşünü bir alarm ile haber vermektedir. Çizelge 3.4’te hat üzerinde bulunan sıcaklık ölçerlerin konumları ve kullanılış amaçları verilmiştir.

Çizelge 3.3: Deney tesisatı üzerindeki ısı çiftlerinin konum ve ölçüm aralıkları.

No:	Kullanıldığı Yer	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
T1	Oksijen Besleme	-99-300 [°C]	± 1 [°C]
T2	Su Buharı Besleme	-99-300 [°C]	± 1 [°C]
T3	Hava Besleme	-99-300 [°C]	± 1 [°C]
T4	Reaktör Çıkışı	0-1200 [°C]	± 2,5 [°C]
T5	Soğutucu Çıkışı	-99-300 [°C]	± 1 [°C]
T6	Vakum Pompası Çıkışı	-99-300 [°C]	± 1 [°C]
T7	Gaz Yakıcı (Flare)	0-1200 [°C]	± 2,5 [°C]

Deney düzeneğinde kullanım yerine ve amacına göre iki farklı türde sıcaklık ölçüm aleti kullanılmıştır. Sıcaklıkların yüksek seviyelere ulaşması beklenen reaktör içi, reaktör çıkışı ve yakıcıda, K tipi ısı çifti kullanılmıştır. K tipi ısı çiftleri geniş ölçüm aralıkları nedeni ile dünya çapında en çok tercih edilen sıcaklık ölçerlerden bir tanesidir. Her ne kadar 1350°C gibi yüksek sıcaklıkların ölçümüne imkân sağlasa da, tek başına bir K tipi ısı çifti deneyde çıkılan yüksek sıcaklıklara dayanmamaktadır. Yapılan literatür araştırması sonucunda reaktör içerisindeki sıcaklıkların 1200°C’lere kadar çıkabildiği görülmüştür. Bu nedenle ısı çiftleri ‘İnkonel’ isimli özel bir alaşım ile kaplanmışlardır. Bu alaşım içerisinde baskın olarak nikel ve krom barındırmakta ve yapısı bozulmadan 1200°C’ye kadar dayanabilmektedir. Hat üzerinde yüksek sıcaklık beklenilmeyen diğer konumlarda ise PT100 tipi direnç termometreleri kullanılmıştır.

Bu tip termometreler yüksek hassasiyet ve güvenilirlikleri ile kısmen daha ekonomik olmaları nedeni ile düşük sıcaklık uygulamalarına uygundur.

Çizelge 3.4: Deney hattı üzerinde kullanılan sıcaklık ölçerlerin yerleri ve kullanım amaçları.

Ölçüm Aletinin Kodu	Ölçüm Aletinin Konumu	Tip	Ölçüm Aletinin Kullanım Amacı
T1	Hava Girişi	PT100	Debinin belirlenmesi amacı ile hal denkleminde kullanılmak üzere
T2	Buhar Girişi	PT100	Debinin belirlenmesi amacı ile hal denkleminde kullanılmak üzere
T3	Oksijen Girişi	PT100	Debinin belirlenmesi amacı ile hal denkleminde kullanılmak üzere
T4	Reaktör Çıkışı	K Tipi	Yapay gazın reaktörden çıkış sıcaklığının belirlenebilmesi amaçlı
T5	Soğutucu Çıkışı	PT100	Soğutucunun etkili çalıştığını kontrol amaçlı
T6	Vakum Pompası Çıkışı	PT100	Debinin belirlenmesi amacı ile hal denkleminde kullanılmak üzere
T7	Yakıcı İçerisi	K Tipi	Pilot alevinin yandığını kontrol amaçlı

Reaktör içerisinde gazlaştırma kanalına denk gelecek sıcaklık ölçerlerden Tr12'nin 9 Nisan 2015 tarihinde 9 noktadan kalibrasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışma Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) tarafından akredite edilmiş PENTA Otomasyon ve Endüstriyel Ürünler San. Tic. Ltd. Şti. tarafınca yürütülmüş ve sertifikalandırılmıştır. Kalibrasyon için bir adet sıcaklık kontrollü şartlandırma bloğu ile bir adet referans sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Sonuç okumaları şartlandırma bloğu içerisindeki ortam sıcaklığı, referans aletin okuduğu ve test edilen Tr12'nin okuduğu değerler tamamen sabit hale geldiği zaman yapılmıştır. Yapılan ölçümlerin sonuçları ve kalibrasyon sertifikası EK A'da verilmiştir.

3.1.3.2 Basınç ölçümü

Deney düzeneği üzerinde basınç ölçümleri üç farklı sebeple alınmaktadır. Bunların ilki orifislerin yakınında, gazların termodinamik hallerinin hesabı içindir. İkinci ve asıl sebep ise hat üzerindeki gösterge basıncının ölçümüdür. Deney düzeneği hattında, reaktör çıkışında basıncın mutlak 1 atm olması istenmektedir. Eğer hat basıncı bu değerine altına düşer ise, oluşan vakum nedeni ile deney düzeneği içerisine taze hava girebilmektedir. Bu oksijen girdisi, istenmeyen durumlara yol açabilir ve uzak durulmalıdır. Hat basıncı atmosfer basıncının üstüne çıkması halinde ise bu sefer elde edilen yapay gaz ile yanma gazları deney ortamına sızacaktır. Bu gazların içerisinde

CO ve H₂S gibi sağığı zararlı moleküller bulunur. Aynı vakum gibi, basıncın artmasından da kaçınmak gerekir. Söz konusu basınç dengelemesi vakum pompasının çalışma noktası değıştirilerek sağılanır.

Son olarak bir adet basınç ölçer ise buharlaştırıcı tankına yerleştirilmiştir. Bu basınç ölçer sayesinde buharlaştırıcı iç basıncı sürekli kontrol edilmekte ve buharlaştırıcı iç basıncının her zaman güvenli bir seviyede tutulması sağılanmaktadır. Bunun yanı sıra alınan basınç ölçümü, SCADA sistemi tarafından sürekli olarak takip edilmekte, iç basıncın 2 bar noktasının $\pm 0,1$ bar çevresinde sabit tutulacak şekilde buharlaştırıcının çalışması ayarlanmaktadır. Bu kontrole göre eğer buharlaştırıcı basıncı 1,9 barın altına düşmüş ise buharlaştırıcı sistem tarafından çalıştırılmakta, 2,1 barın üstüne çıkmış ise buharlaştırıcı durdurulmaktadır.

Deney düzeneğinde kullanılan basınç ölçerlerin konumlandırıldıkları noktalar, ölçüm aralıkları ve ölçüm hassasiyetleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5: Deney tesisatı üzerindeki basınç ölçerlerin konum ve ölçüm aralıkları.

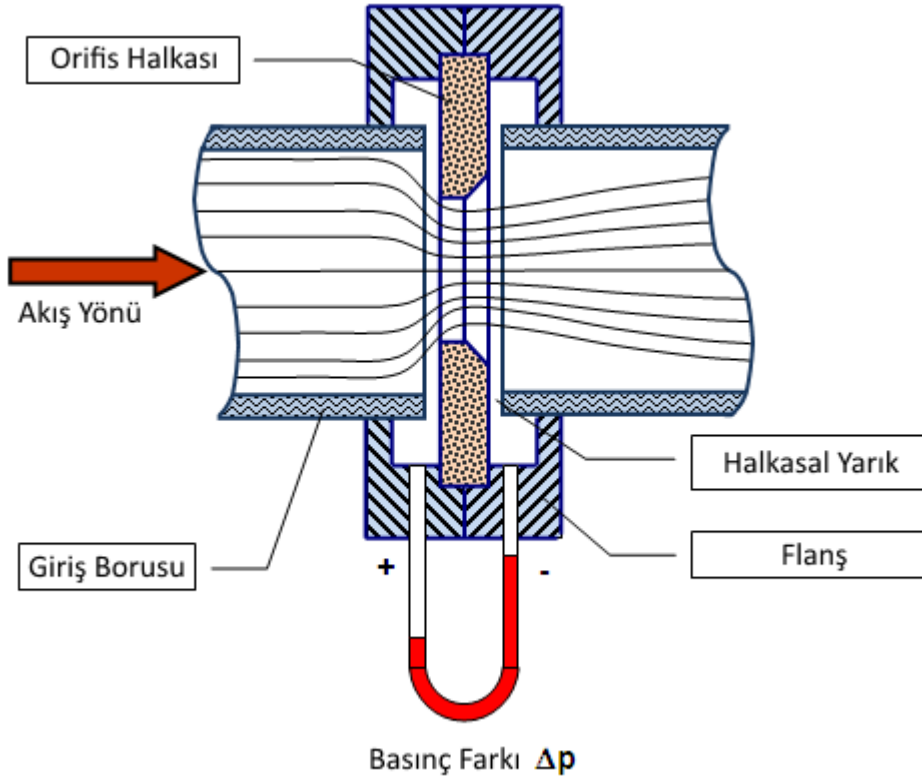
No:	Kullanıldığı Yer	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
P1	Oksijen Besleme	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P2	Su Buharı Besleme	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P3	Hava Besleme	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P4	Siklon Girişı	-1 - 3 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P5	Yıkama Kolonu Çıkışı	-1 - 3 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
BB	Buharlaştırıcı İçi	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]

3.1.3.3 Debi ölçümü

Hat üzerinden geçen hacimsel debinin hesabı, orifisler yardımı ile yapılmaktadır. Bir orifis halkası, akışta alanında ani bir daralma ve sonrasında genişleme oluşturan rijit bir plakadır. Akışın yaşadığı bu daralma esnasında hız artmakta ve basınç düşmektedir. Akışın hızı ne kadar fazla ise, basınç düşümü de o kadar yüksek olmaktadır. Buna bağılı olarak orifisin önü ve arkası arasında oluşan basınç farkının ölçülmesi, akışın hızını belirlemek için yeterli olmaktadır. Bir orifisin çalışma prensibi Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

Deney düzeneğinin tasarım aşamasında debi ölçümünün gerçekleştirilmesi için farklı yöntemler incelenmiş fakat pratik uygulanabilirliğinin yüksek oluşu nedeni ile orifis ile debi ölçümü yapılmasına karar verilmiştir. Bu kararda, özellikle yapay gazın bileşiminin ölçüm öncesinde ya da sırasında bilinmiyor olmasının etkisi büyük olmuştur. Orifisin bu konuda en büyük avantajı, deney sırasında alının fark basıncı

ölçümlerinin, deney sonrasında yapay gaz bileşimine göre değerlendirilebilmesi ve debi hesabının yapılabilmesidir.



Şekil 3.12: Orifisin çalışma prensibi.

Orifis denklemi (3.1) şu şekildedir:

$$q_m = \left[\frac{C}{(1 - \beta^4)^{0,5}} \right] \cdot \epsilon \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot (d^2) \cdot [2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)]^{0,5} \quad (3.1)$$

Buradaki terimler sırası ile:

q_m = Kütlesel debi $\left[\frac{kg}{s} \right]$

C = Debi katsayısı [Boyutsuz]

$\beta = \frac{d}{D} = \frac{\text{Orifis Çapı [m]}}{\text{Boru Çapı [m]}}$

ϵ = Genleşebilirlik Faktörü [Boyutsuz]

ρ = Akışkanın yoğunluğu $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

P_1 = Giriş Basıncı [Pa]

P_2 = Çıkış Basıncı [Pa]

olarak tanımlanmaktadır. Orifis hesabının en önemli noktası debi katsayısı C 'nin hesabıdır. Sistemimizde kullanılan orifis için debi katsayısı denklem 3.2 ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 C = & 0,5961 + 0,0261.\beta^2 - 0,216.\beta^8 + 0,000521.\left(\frac{10^6.\beta}{Re}\right)^{0,7} \\
 & + \left[(0,0188 + 0,0063.A).\beta^{3,5}.\left(\frac{10^6}{Re}\right)^{0,3} \right] \\
 & + \left\{ [0,043 + (0,08.e^{-10.L_1}) - (0,123.e^{-7.L_1})].(1 \right. \\
 & \left. - 0,11.A).\left(\frac{\beta^4}{1-\beta^4}\right) \right\} - \left[0,031.M_2 - \left(\frac{0,8.M_2^{1,1}}{\beta^{1,3}}\right) \right] \\
 & + \left[0,011.(0,75 - \beta).\left(2,8 - \frac{D}{0,0254}\right) \right]
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Bu denklemde

$$Re = \frac{(2.q_m)}{(\pi.\mu.D)} \quad (3.3)$$

$$A = \frac{(19000.\beta)^{0,8}}{(Re)} \quad (3.4)$$

$$M_2 = \frac{(2.L_2)}{(1-\beta)} \quad (3.5)$$

yardımcı bağıntıları kullanılmaktadır. Burada μ akışkanın dinamik viskozitesidir $[kg/m.s]$. L_1 ve L_2 ise basınç ölçümü alınan noktalarının, orifise uzaklığı olarak tanımlanmakta ve bir tasarım kriteri olarak karşımıza çıkmaktadır. Deney düzeneğinde kurulu olan orifisler için bu oran denklem 3.6'da verilmiştir.

$$L_1 = L_2 = \frac{0,0254}{(D)} \quad (3.6)$$

Genleşebilirlik faktörü ε ise denklem 3.7 ile hesaplanır.

$$\epsilon = 1 - (0,351 + 0,256.\beta^4 + 0,93.\beta^8) \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (3.7)$$

Burada κ , izentropik ısı çarpanıdır.

Yukarıda bahsedilen denklem sistemi, kendi içerisinde iterasyon yapılmasını gerektirmektedir. Dikkat edilecek olunursa, debi katsayısı Reynolds sayısının bir fonksiyonudur. Ancak Reynolds sayısının tam değeri önceden bilinmemektedir. Bu nedenle hesaplara öncelikle bir Re tahmin edilerek başlanır, elde edilen debi değerine göre Re güncellenir. Re sayısında ve debi değerlerinde herhangi bir değişim olmayana kadar çözüm iteratif olarak devam eder.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan debiler hacimsel debilerdir. Orifis denklemi sonucu elde edilen kütleli debi denklem 3.8 yardımı ile rahatlıkla hacimsel debiye çevrilebilmektedir.

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} \times 3600 \quad (3.8)$$

$$q_v = \text{Hacimsel Debi} \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Orifis denklemi incelendiğinde, genişletirlik faktörü hesabında P_2/P_1 oranının bulunması gerektiğini görmekteyiz. Bu nedenle yalnızca $(P_1 - P_2)$ fark basıncının ölçülmesi yeterli olmayacaktır. Bunun yanında P_1 ya da P_2 mutlak basıncının da bilinmesi gerekmektedir.

Denklemden açıkça belli olmasa da önemli bir diğer konu ise ölçülecek olan gazın yoğunluğudur. Besleme gazları için yoğunluk ideal gaz denklemi kullanılarak rahatça hesaplanabilir.

$$\rho_i = \frac{PM_i}{RT} \quad (3.9)$$

Burada P mutlak basınç [Pa], M_i maddenin mol kütlesi [kg/mol], R ise evrensel gaz sabitidir [J/mol.K]. Denklemden görüldüğü gibi, debi ölçümünün alınacağı noktadan sıcaklık ve basınç ölçümlerinin de alınması, daha doğru bir debi hesabı yapılmasına imkân verir.

Yapay gazın debi hesabı için ise durum biraz daha karışık haldedir. Deney süreci boyunca yapay gazın özelliği de değişmektedir. Üretilen yapay gazın bileşimine göre, yoğunluğu da oldukça farklılık gösterebilir. Örneğin hidrojen zengin bir yapay gazın yoğunluğu, besleme gazlarının yoğunluğundan oldukça düşük olacaktır. Yapay gazın yoğunluğunu veren ifade denklem 3.10'da verilmiştir.

$$\rho = \sum \rho_i = \frac{P}{RT} \sum x_i M_i \quad (3.10)$$

Burada x_i , i bileşeninin molar (ya da hacimsel) oranını ifade etmektedir. Açıkça görülmektedir ki, yapay gazın debisinin doğru hesaplanabilmesi için, gazın bileşiminin biliniyor olması gereklidir. Tüm bunların yanında, yapay gazın bileşimini öğrenmek için verilen bir GC analizi, yaklaşık olarak 20 dakika sürmektedir. SCADA sistemine, yapay gaz bileşimine göre dinamik olarak değişen, içerisinde irrasyonel üstel terimler olan ve iteratif bir şekilde çözülmesi gerekli olan bir denklem yazmak mümkün değildir. Bu nedenle söz konusu sistem, yapay gazın debisini anlık olarak sunma yetisine sahip değildir. Fakat deney sonu hesaplamalar düşünüldüğünde mevcut sistem oldukça iyi sonuç verecektir.

Çizelge 3.6: Kullanılan orifis halkalarının dar boğaz çapları.

	Hava	Oksijen	Buhar	Yapay Gaz
Küçük Orifis	11 mm	7 mm	7 mm	15 mm
Büyük Orifis	14,5 mm	11 mm	9 mm	19,5 mm

Tek bir orifis halkası ile tüm debilerde sağlıklı ölçüm almak mümkün değildir. Ölçülecek olan sisteme uygun boru çapı ve orifis halkası kullanılması gerekmektedir. Yapılan deneylerde de birçok farklı debi değerinin kullanılması planlanmaktadır. Bu nedenle her kullanılan orifis için bir adet düşük, bir adet ise yüksek debilerde kullanılmak üzere ikişer adet orifis halkası bulunmaktadır. Çizelge 3.6'de kullanılan orifis halkalarının iç çapları verilmektedir. Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de ise orifis halkalarının kodları, ölçüm aralıkları ve ölçüm hassasiyetleri verilmiştir.

Çizelge 3.7: Debi ölçerlerin konum ve ölçüm aralıkları (düşük debi).

No:	Kullanıldığı Yer	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
F1-1	Oksijen Besleme	0-5 [m ³ /h]	± 0,05 [m ³ /h]
F2-1	Su Buharı Besleme	0-4 [kg/h]	± 0,04 [kg/h]
F3-1	Hava Besleme	1-12 [m ³ /h]	± 0,12 [m ³ /h]
F4-1	Toplama Kabı Çıkışı	5-20 [m ³ /h]	± 0,20 [m ³ /h]

Çizelge 3.8: Debi ölçerlerin konum ve ölçüm aralıkları (yüksek debi).

No:	Kullanıldığı Yer	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
F1-2	Oksijen Besleme	0-10 [m ³ /h]	± 0,1 [m ³ /h]
F2-2	Su Buharı Besleme	0-10 [kg/h]	± 0,1 [kg/h]
F3-2	Hava Besleme	1-20 [m ³ /h]	± 0,2 [m ³ /h]
F4-2	Toplama Kabı Çıkışı	5-40 [m ³ /h]	± 0,4 [m ³ /h]

3.1.3.4 Gaz kromatografi

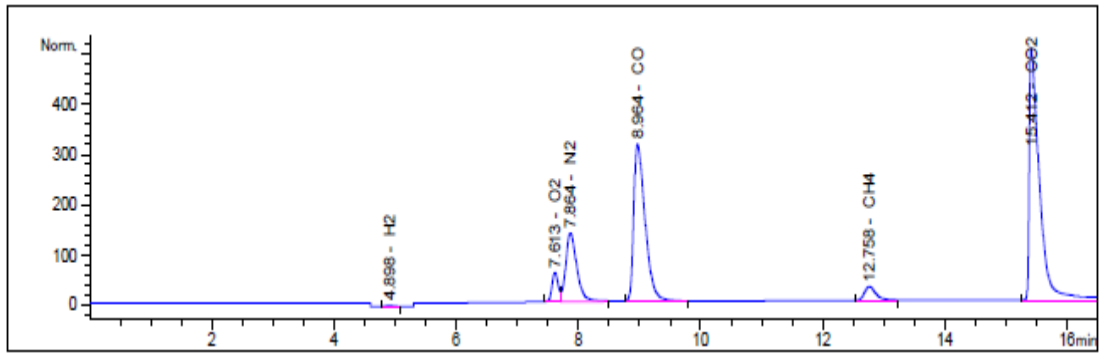
Reaktör içerisinde gerçekleşecek gazlaştırma tepkimeleri sonucunda açığa çıkacak yapay gaz bileşiminin analizi için Agilent 7890B gaz kromatografi cihazı kullanılmaktadır (Şekil 3.13). Gaz kromatografi cihazı, örneklenen gazın bileşenlerinin moleküler olarak birbirlerinden ayrıştırılması prensibini esas alarak çalışmaktadır. Bu ayrıştırmayı sağlayabilmek için öncelikle örnek gaz, tepkimeye girmeyeceğinden emin olunan ve bir taşıyıcı gaz (mevcut sistemde bu He'dir) içerisine karıştırılır. Taşıyıcı gaz daha önce belirlenmiş bir 'metod'a göre şartlandırılmış fırın içerisinde bulunan, içerisinde 'hareketsiz faz' olarak adlandırılan özel bir malzeme bulunan 'kolon' isimli düşük iç çaplı, uzun bir spiral boru içerisinde sürekli olarak akmaktadır.



Şekil 3.13: Gaz Kromatografi Cihazı.

Örnek alınan gazın kolona girmesi ile birlikte, örnek gaz içerisindeki farklı moleküler bileşenler, çeşitli fiziksel/kimyasal etkiler nedeni ile taşıyıcı gaz içerisinde birbirlerine göre farklı hızlarda ilerleme gösterirler. Böylece hareket hızları farklı olan bu

bileşenler, kolonun sonunda birbirlerinden tamamen ayrışırlar. Kolon çıkışında bulunan bir sensör, taşıyıcı gaz dışında herhangi bir bileşen görmesi halinde bir elektrik sinyali üretir. Sensöre gelen bileşenin miktarı ne kadar fazla ise, sensörün oluşturduğu sinyal o kadar kuvvetli olmaktadır. Ayrıca her bir bileşen kolon boyunca farklı bir hızla ilerlediği için, örnek gazın ilk sisteme alınmasından itibaren her bir bileşen, sistemde farklı bir süre kalmaktadır. Bu durumda, sensörde görülen sinyallerin enjeksiyondan sonra hangi zamanda yaşandığının tespit edilmesi, aynı zamanda hangi bileşenin algılandığının da göstergesidir. Gaz kromatografi cihazı tarafından yapılan bir analiz sonucu alınan verilerin görünümü Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Örnek bir gaz kromatografi sonucu.

Bu cihazın kalibrasyonu, içeriği bilinen bir referans gazın sisteme enjeksiyon yapılması ve analiz sonuçlarının bilinen içeriğe göre tanıtılması esasına dayanmaktadır. Bir başka deyişle referans gaz cihaza enjekte edilir ve analiz sonuçları referans gazın bilinen “molar yüzde” değerleri olarak tablo halinde cihaza girilir. Çizelge 3.9’da kullanılan referans gazın analiz sonuçları görülmektedir. Yapılan her deneyden önce gaz kromatografi cihazı bu referans gaz yardımı ile kalibre edilmektedir. Deneyler esnasında örnek alınan yapay gaz ile yapılan analizler sonucunda oluşan veriler, referans gaz kullanılarak oluşturulmuş kalibrasyon tablosu ile karşılaştırılarak yapay gazın molar yüzde sonuçları verilmektedir.

Çizelge 3.9: Kullanılan referans gazın bileşimi (molar oran).

	H ₂	N ₂	O ₂	CO	CO ₂	CH ₄
Teorik	20,0%	35,0%	2,0%	15,0%	20,0%	8,0%
Ölçülen	19,01%	33,74%	2,05%	16,4%	20,18%	8,62%
Doğruluk	± 2%	± 0,2%	± 2%	± 2%	± 2%	± 2%

Gaz kromatografi cihazı yaklaşık 20 dakikalık bir işlem sonrası sonuç vermektedir. Bir başka deyişle gaz kromatografi cihazı, deney sırasında elde edilen yapay gazın verilerini 20 dakikalık bir gecikme ile sunmaktadır. Burada başlangıçta bu cihazın

seçilmesinin sebebi hem daha geniş gaz içeriğinin analiz edilebilmesi hem de analiz edilen gazlarda herhangi bir oran sınırlamasının olmamasıdır. Ancak 20 dakikalık işlem gerektirmesi de yapay gazın anlık olarak değerlendirilmesini engellemektedir.

3.1.3.5 SCADA sistemi

Gaz kromatografi cihazı dışında kalan tüm ölçüm aletleri gruplanarak SCADA sistemine bağlanmaktadır. Çizelge 3.10'da kullanılan ölçüm aletlerinin tipleri, modelleri ve SCADA sistemine erişmekte kullandıkları dijital adresleri verilmiştir. SCADA sistemi, tüm ölçümlerin anlık olarak kontrol ekranında görülmesini sağlar. Toplanan verilerin ekranda gösterilmesinin yanı sıra, sistem her üç saniyede bir topladığı verileri dijital olarak kaydetmektedir. Böylece deney sonuçları daha sonra ayrıntılı incelemek amacı ile kayıt altında tutulur.

Bunun yanı sıra sistem üzerinden deney düzeneği üzerindeki çeşitli ekipmanların çalışması kontrol edilebilmektedir. Üflecin çalıştırılması, soğutucu fanının ve su pompasının devreye alınması ve devreden çıkarılması gibi aç/kapa işlemleri yapılabildiği gibi, ekipmanların çalışmasında daha ayrıntılı ya da otomatik kontroller de mevcuttur. Örneğin vakum pompasının çalışma frekansı deney esnasında SCADA sistemi üzerinden kontrol edilebilmektedir.

Buharlaştırıcının kontrolü ise otomatik olarak sağlanmaktadır. Buharlaştırıcı üzerinde bulunan basınçölçer ile iç basınç sürekli olarak kontrol edilmektedir. Buhar basıncı belli bir seviyede tutulacak şekilde SCADA sistemi buharlaştıricıda bulunan ısıtıcıyı açıp kapatabilmektedir. İstenilen basınç değeri ve toleransı sistem üzerinden değiştirilebilmektedir. Normal çalışma şartlarında çalışma basıncının 2,0 bar, toleransının ise 0,1 bar olması istenmektedir. İç basınç kontrolünün yanında, buharlaştırıcı içerisindeki suyun seviyesi de SCADA sistemi tarafından algılayıcılar sayesinde sürekli denetlenmektedir. Su seviyesi düştüğünde sistem, buharlaştırıcının su giriş hattında bulunan selanoid valfi açmakta, böylece su alımını başlatmaktadır. Su seviyesi belli bir yüksekliğe ulaştığında ise sistem bunu otomatik olarak algılayıp su alımını kesmektedir. Su alım işlemi dilerse otomatik kontrolden çıkarılarak kullanıcının kontrolüne de bırakılabilmektedir.

Çizelge 3.10: Ölçüm cihazlarının SCADA sistemine bağlı oldukları dijital adresler.

Cihaz	Tip	Adres	Port
Tr1	K Tipi	1	0
Tr2	K Tipi	1	1
Tr3	K Tipi	1	2
Tr4	K Tipi	1	3
Tr5	K Tipi	2	0
Tr6	K Tipi	2	1
Tr7	K Tipi	2	2
Tr8	K Tipi	2	3
Tr9	K Tipi	3	0
Tr10	K Tipi	3	1
Tr11	K Tipi	3	2
Tr12	K Tipi	3	3
Tr13	K Tipi	4	0
Tr14	K Tipi	4	1
Tr15	K Tipi	4	2
Tr16	K Tipi	4	3
Tr29	K Tipi	5	0
Tr30	K Tipi	5	1
Tr33	K Tipi	5	2
Tr34	K Tipi	5	3
T1	PT100	11	0
T2	PT100	11	1
T3	PT100	11	2
T4	K Tipi	6	3
T5	PT100	9	0
T6	PT100	9	1
T7	K Tipi	9	3
P1	Keller PAA-21Y	10	0
P2	Keller PAA-21Y	10	1
P3	Keller PAA-21Y	10	2
P4	Keller PAA-21Y	7	2
P5	Keller PAA-21Y	7	1
F1	Dwyer MS331	8	1
F2	Dwyer MS331	8	0
F3	Dwyer MS331	8	2
F4	Dwyer MS331	7	0
BB	Keller PAA-21Y	8	3

3.2 Deney Plan ve Programı

Deneylerin sağlıklı bir şekilde yürütülmesi ve tekrarlanabilir olmaları için deney hazırlıklarının belli bir standartta yapılması gereklidir. Bu nedenle hazırlık çalışmaları sırasında yapılacaklar bir liste haline getirilmiştir. Ayrıca deney sırasında yapılacaklar ve dikkat edilmesi gereken konular da ayrıca düzenlenmiştir.

3.2.1 Deney düzeneğinin hazırlanması

Yeraltında kömür gazlaştırma deneylerinin yapılmasında daha önceden de belirtildiği gibi en önemli aşaması, deneyin hazırlık aşamasıdır. Hazırlık aşaması da iki temel bölüme ayrılabilir. Bunlardan ilki deney düzeneği üzerinde bulunan tüm ekipmanların temizliğini ve denetimini kapsamaktadır. İkinci bölüm ise deneyde kullanılacak kömürün ve reaktörün hazırlanmasıdır.

Tesisat üzerinde yapılan temizlik çalışmaları, deneyin sonlanması ile başlamaktadır. Soğutucuda ve toz tutucuda biriken maddelerden örnek alındıktan sonra, yıkama kolonunda ve vakum pompasına ait su tankında bulunan su ile birlikte tahliye edilmektedir. Tüm ekipmanlar deney sonrasında en az bir kere su yardımı ile yıkanmaktadır. Bunun amacı, deney sonrası kalmış atık maddelerin bir sonraki deney hazırlığına kadar sistem üzerinde herhangi bir paslanma ve aşınmaya sebep olmasını engellemektir.

Deney hazırlıklarının başlangıcında, reaktör dışında tüm ekipmanlar tekrar boşaltılarak yıkanmakta, ardından taze su ile doldurulmaktadırlar. Yıkama kolonunda su hareketini sağlayan pompa çalıştırılarak püskürtücülerden suyun yeterli çıkıp çıkmadığı kontrol edilmektedir. Vakum pompasına su sağlayan tank da istenilen seviyeye kadar doldurulmaktadır.

Ön hazırlık aşamasının bir diğer önemli noktası ise deney düzeneği üzerinde bulunan bağlantı noktalarının kontrolüdür. Özellikle flanşlı bağlantılar deney başlangıcından önce tekrar kontrol edilmektedir. Hatalı yapılan bağlantılar deney esnasında kaçaklara ya da hatta temiz hava girişine sebep olmaktadır. Her iki durumun da olumsuz etkileri bulunur. Olası bir kaçak durumunda deney ortamına zehirli gazlar yayılabilmektedir. Tesisata taze hava girmesi ise elde edilen yapay gazın özelliklerini değiştirmekte, tekrar yanmalara sebep olabilmektedir. Özellikle bu durumdan kaçınılmalıdır.

Deney hazırlıklarının asıl kritik noktası ise kullanılacak olan kömürün ve reaktörün hazırlanmasıdır. Sağlıklı bir deney için dikkat edilmesi gereken birkaç nokta bulunmaktadır. Bunlardan ilki üzerinde deney yapılacak kömürün büyüklüğüdür. Kömür, reaktör içerisinde, özellikle yan taraflardan mümkün olduğunca az boşluk kalacak düzeyde büyük seçilmelidir. Büyük bir kömür bloğu hem reaktör içerisinde adyabatik şartların sağlanmasını kolaylaştırmakta, hem de daha sağlıklı bir gazlaştırma yaşanmasını sağlamaktadır.

Kömür bloğu eğer biçimsiz ise, kömür öncelikle olabildiğince dikdörtgen prizma şekline sokulmaktadır. Reaktör tabanına 2-3 cm kalınlığında olacak şekilde kum yayılmakta, kömür bloğu bu kum tabakasının üzerine yerleştirilmektedir. Reaktör duvarları ile kömür bloğu arasında kalan boşluk ise ince kömür taneleri ile doldurularak sıkıştırılmakta, böylece boşluk herhangi bir kısım kalmaması sağlanmaktadır. Kömürün durumuna bağlı olarak reaktör giriş-çıkışı ile gazlaştırma kanalının bağlantısının herhangi bir çökme ve benzeri bir durum ile engellenmediğinden emin olmak amacı ile kısa çelik borular kullanılabilir.

Reaktör içerisine yerleştirilen kömür bloğunda 22 mm yarıçapa sahip matkap yardımı ile gazlaştırma kanalı açılmaktadır. Ayrıca ısı çiftlerinin kömür içerisine yerleştirilmesi için de kömür bloğu yan taraflardan 10 mm çaplı matkap ile kömürün orta noktasına kadar delinmektedir. Isıl çift için kanallar açılır iken Tr4, Tr8, Tr12 ve Tr16 kodlu ısı çiftlerinin tam olarak gazlaştırma kanalı içerisine denk geleceğinden emin olunmalıdır. Böylece deney süresince kömür sıcaklığının yanı sıra, gazlaştırma kanalının sıcaklıklarının da denetlenmesi mümkün olmaktadır.

Kömür yerleştirilerek gazlaştırma kanalı ve ısı çift kanalları açıldıktan sonraki işlem, kömürün üst kısmının herhangi bir gaz kaçağı olmayacak şekilde ısıya dayanıklı tuğla ile kapatılmakta ve ısı kayıplarını engellemek amacı ile tuğlaların üzerine seramik yünü serilmektedir.

Son olarak deney esnasında kullanılacak olan azot, oksijen, propan ve referans gaz tüplerinin yeterli miktarda ve seviyede bulunduğu kontrol edilmekte, eksik bulunması durumunda yenisinin temin edilmesi sağlanmaktadır.

3.2.2 Deneyin yapılışı

Tüm hazırlıklar ve kontroller yapıldığında deneye başlanabilir. Deney başlanmadan önce yapılması önerilen birkaç işlem bulunmaktadır. İlk olarak GC cihazı ile referans gaz kullanılarak deney öncesinde bir kere analiz yapılarak cihazın kalibrasyonunun geçerliliğinin test edilmesi, deney sonuçlarına olan güveni arttıracaktır. Bunun yanında deney başlamadan hemen önce yakıcıda bulunan pilot alevin ateşlenmesi ve deney boyunca alevin korunması, deney boyunca oluşabilecek hoş olmayan kokuların azaltılması ve ortaya çıkabilecek yanabilir gazların imhası için tavsiye edilmektedir. Yakmanın başlaması ile birlikte yıkama kolonunda su devirdaimi de başlatılmaktadır.

Deneyin ilk aşaması, kömür bloğunun yakılarak sıcaklığının yükseltilmesidir. Yapılan literatür araştırması ve ön çalışmaların sonucunda kömür bloğu sıcaklığının gazlaştırma sürecine büyük etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Yetersiz bir ilk ısıtma sonucu gazlaştırma deneyi başarısız olabilmektedir.

Yakma aşamasında besleme düzeneği reaktörden ayrılmaktadır. Kömür, giriş tarafından reaktörün içerisine doğru verilen propan alevi tarafından ısıtılmakta ve yakılmaktadır. Reaktörün içerisine doğru bir akım oluşması için vakum pompası kullanılmaktadır. Bu evrenin başlaması ile birlikte SCADA sistemi üzerinden veri kaydı da başlatılır. Yakma aşaması bir buçuk saat ile 2 saat arasında sürmektedir.

Yakma aşaması ile kömür bloğu yeterli düzeyde ısıtıldığında, besleme düzeneği reaktör girişindeki rekorlu bağlantı yardımı ile takılmakta ve gazlaştırma ajanları daha önce belirlenmiş ve ayarlanmış debilerde beslenmeye başlanmaktadır. Bu aşamadan sonra deneyin gidişatı dikkatle takip edilir. Sıcaklıklarda yaşanan aşırı yükselmeler ya da beklenmeyen düşüşler takip edilerek uygun debi ayarlamalı yapılır.

Daha önceden bahsedildiği şekilde GC cihazı ancak 20 dakikada bir örnek alabilmektedir. Fakat çoğu zaman bu sıklıkta örnek almak da mümkün olmamaktadır. Örnek alma hattında bir önceki analizden kalan yapay gazın bulunması ihtimaline karşı, bu hat üzerinden bir süre boyunca gaz tahliye edilmektedir. Tahliye işlemi sonucunda güncel gazın örnekleneceğinden emin olunmadan GC'ye örnek alımı gerçekleştirilmemektedir. Sonuçların zaman farkı ile geliyor olması nedeni ile yakıcı tarafı da sürekli olarak kontrol edilerek gazlaştırma sonucu yanıcı gaz eldesinin gerçekleşip geçmediği görsel olarak teyit edilir.

Gazlaştırma işlemi sırasında çıkan H_2S 'in verimli bir şekilde tutulabilmesi için yıkama kolonu içerisinde dolaşan suyun bazikliğini kaybetmemesi gerekir. Genel olarak pH seviyesinin 9'un altına düşmemesi istenmektedir. Bu nedenle deney boyunca yarım saat aralıklar ile pH seviyesi kontrol edilmekte ve gerektiği halde sisteme NaOH eklenmektedir.

Deney ilerledikçe bir noktadan sonra gazlaştırma sürecini sağlıklı yürütülemediği görülmüştür. Aynı zamanda sıcaklıkların kontrol edilmesi ve kaliteli yanıcı gaz eldesinin mümkün olmadığı gözlemlenmektedir. Bu noktada deneyin sonlandırılma kararı alınır. Deney sonlandırma işlemi için öncelikle gaz beslemesi kesilmektedir. Reaktör içerisinde tepkimeye girebilecek herhangi bir gaz bileşeninin kalmadığından

emin olunmak istenir ise sisteme saf azot basılabilmektedir. Bu işlem ayrıca soğumayı da hızlandırmaktadır. Reaktörün herhangi bir yerden içerisine taze hava çekemeyeceğinden emin olunmalıdır. Yapay gaz çıkışı durana kadar yakıcı, yıkama kolonu ve soğutma fanı gibi teçhizatlar kapatılmamalıdır. Ancak sıcaklıklar güvenli bir seviyeye düştüğünde ve yapay gaz çıkışı tamamen durduğunda bu teçhizatların kapatılması tavsiye edilir.

Reaktör içerisindeki kömür bloğu soğuduğunda reaktör açılabilir. Deneyden arda kalan kömürün durumunu incelemek için yalıtım için konulan tabakalar kaldırılır. Genellikle oyuk büyümesine bağlı olarak kömür bloğunda çökmeler gerçekleşmektedir. Bu nedenle kömür bloğunun üst kısmına dizilmiş olan ısıya dayanıklı tuğlaların özenle alınması gerekmektedir. Kömür bloğuna erişildiğinde oyuğun ilerlemesi ve deneyin nasıl gerçekleştiği ile ilgili tespitler yapılarak kömür bloğu fotoğraflanır. Gazlaştırılan bölümlerden kömür ve kül örnekleri alınarak reaktörün temizlenme aşamasına geçilir.

4. DENEY SONUÇLARI

Yeraltında kömür gazlaştırma sürecine etki eden parametrelerin daha iyi anlaşılabilmesi, sürecin benzetiminin yapılabilmesi, en yüksek kaliteli yanıcı gaz elde için uygulanması gereken yöntemler ile yeni gazlaştırma tekniklerinin denenebilmesi amacı ile bir dizi çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneylerden birkaçının sonuçları çalışmada verilmiştir.

Deneylerde kullanılan kömür, Tekirdağ'a bağlı Malkara ilçesi, Pirinççeşme bölgesinde bulunan 3 numaralı yataktan temin edilmektedir. Buradan elde edilen kömürün özellikleri incelenmiş ve Çizelge 4.1 ile Çizelge 4.2'de verilmiştir [65].

Çizelge 4.1: Malkara kömür numunesinin kısa analiz sonuçları [65].

	Analiz Tipleri	Orijinal Numunede	Havada Kuru Numunede	Kuru Numunede	Yöntem
	Nem	25,17	15,27	-	ASTM D 7582-2012
Kısa Analiz (% kütle)	Kül	17,95	20,33	23,99	ASTM D 7582-2012
	Uçucu Madde	28,74	32,55	38,41	ASTM D 7582-2012
	Sabit Karbon	28,14	31,86	37,60	ASTM D 7582-2012
Isıl Değer (kcal/kg)	Alt Isıl Değer	3602	4151	4998	ASTM D-5865
	Üst Isıl Değer	3894	4409	5203	ASTM D-5865

Çizelge 4.2: Malkara kömür numunesinin elementer analiz sonuçları [65].

	Birimi	Kuru Numunede	Yöntem
C (Karbon)	% kütle	57,02	ASTM D 5373-14
H (Hidrojen)	% kütle	3,99	ASTM D 5373-14
N (Azot)	% kütle	1,44	ASTM D 5373-14
S (Kükürt)	% kütle	5,41	ASTM D 4239-14
Kül	% kütle	23,99	ASTM D 7582-12
Oksijen	% kütle	8,15	ASTM D 3176-09

4.1 Birinci Gazlaştırma Deneyinin Sonuçları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sağlıklı deneylerden ilki 11 Mayıs günü gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma ajanı olarak deney boyunca yalnızca saf oksijen kullanılmıştır. Deney, ön hazırlık ve sistemin kapatılması ile birlikte toplamda 16 saat sürmüştür.

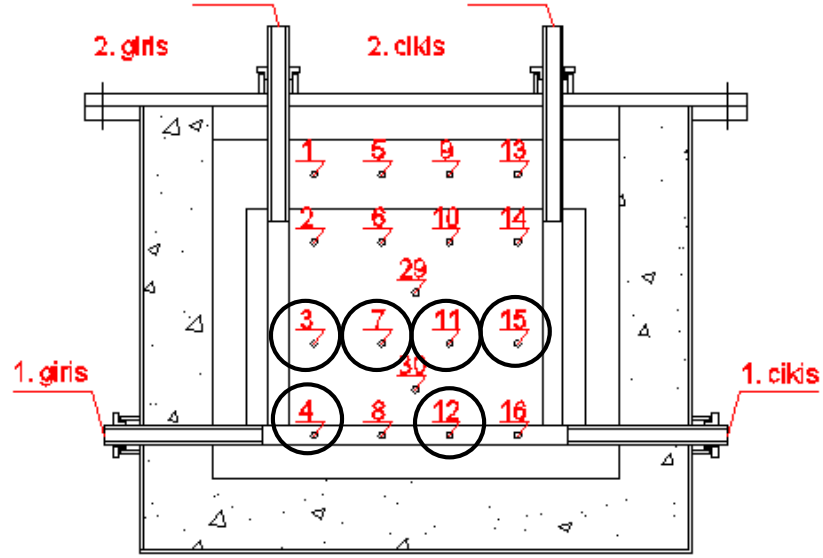
Deneyde kullanılan kömür bloğu $62 \times 41 \times 20$ cm boyutlarındadır. Kömür bloğunun kütlesi ise 85 kg olarak belirlenmiştir. Kullanılan kömür numunesi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Reaktör duvarları ile ana kömür bloğu arasında kalan boşluk kömür parçaları yardımı ile tamamen doldurulmuştur. Kömür bloğunun üzerine yalıtım sağlaması ile ısıya dayanıklı tuğla döşenmiş ve seramik yünü ile kapatılmıştır.



Şekil 4.1: Deneyde kullanılan kömür bloğunun reaktör içerisinde görünümü.

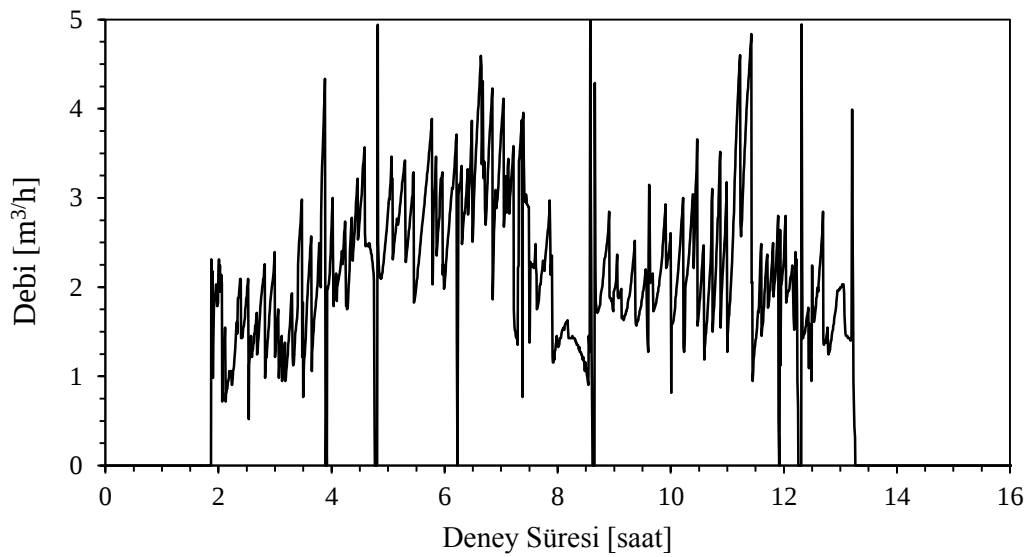
Reaktör içerisinde 6 noktadan sıcaklık ölçümü alınmıştır. Sıcaklık ölçümü alınan noktalar ve bunlara denk gelen ısı çift numaraları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Tr4 ve Tr12 kodlu ısı çiftler tam olarak açılan gazlaştırma kanalının içerisinde olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Gazlaştırma kanalı 22 mm çaplı matkap ucu ile açılmıştır ve reaktörün giriş ile çıkışı arasında bağlantı sağlamaktadır.

Deneylere, yaklaşık 2 saat süre boyunca propan gazının reaktör kanalı içinde yakılması ile ateşleme yapılarak başlanmıştır. Kömür sıcaklığı belirli bir değere ulaştığında, sisteme $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ debi ile oksijen beslemeye başlanmıştır. Reaktör çıkış noktasındaki basıncın atmosfer basıncı değerinde kalması en önemli deney parametresi olmuştur. Bunu sağlamak için sistemdeki vakum pompasının devir sayısı değiştirilmiştir.



Şekil 4.2: Reaktör içerisinde sıcaklık ölçüm noktaları.

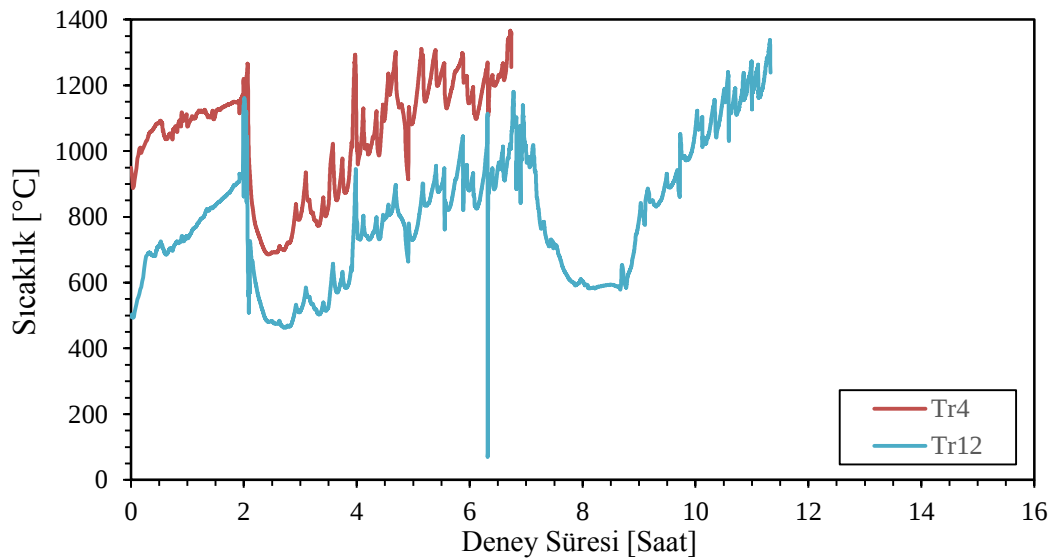
Deney boyunca reaktörde üretilen gaz, önce döngülü toz tutucudan geçip katı parçacıklardan ayrıştırılmış, hava soğutmalı ısı değiştiricisinde soğutulmuş ve daha sonra H_2S yıkama kolonunda yıkanmıştır ve son olarak doğrudan gaz yakıcıya gönderilerek tamamen yanması sağlanmıştır. Gaz yakıcıda yanma olup olmadığı, hem görsel olarak hem de burada bağlı bir ısı çift yardımı ile ölçülen yüksek sıcaklıklar ile kontrol edilmiştir. Oksijen beslemesi başladıktan 1 saat sonra pilot alev kesilmiştir ve karışım gazı kendi kendine yanmaya devam etmiştir. Karışım gazının kendi kendine yanması durumu yaklaşık 11 saat sürmüştür.



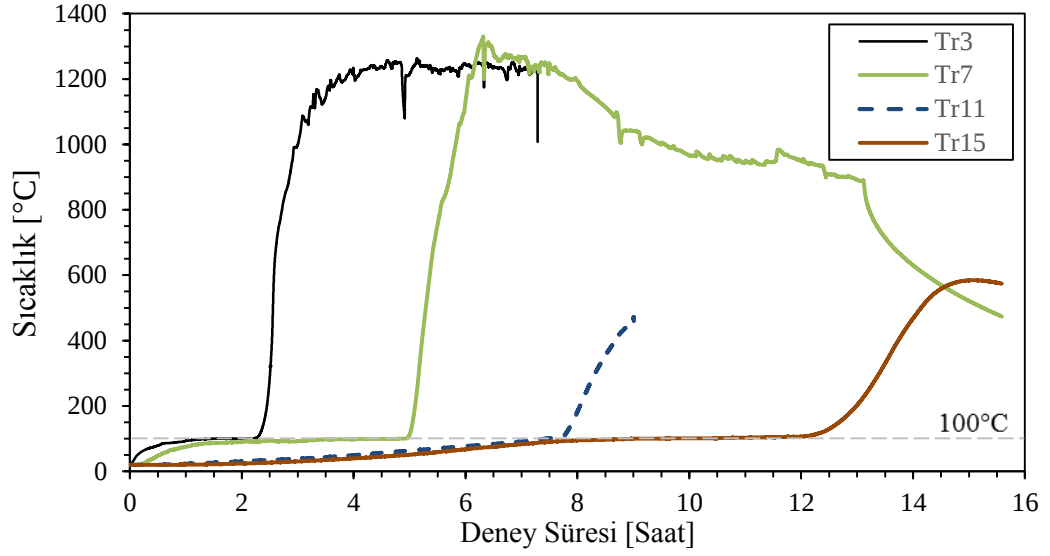
Şekil 4.3: Deney boyunca oksijen besleme debisinin zamanla değişimi.

Şekil 4.3'te deneyler sırasında oksijen debisindeki değişimi, orifis debi ölçer cihazında ölçülen fark basınçlar yardımıyla gösterilmiştir. Buradan oksijen debisinin çok değişken olduğu görülmektedir. Deney süresinde özellikle gaz kromatografi cihazıyla yapılan analizlerin yanında test amaçlı olarak kullanılan Testo 350 baca gazı analizörü ile yapılan ölçümler sonucuna bağlı olarak oksijen miktarı ayarlanmıştır. Bu ayarlama işlemi oksijen tüpü üzerindeki regülatör vasıtasıyla yapılmıştır ancak regülatör, debi kontrolünde kararlı bir yöntem olmamıştır. Bu sebeple kontrol panosu ile debi ölçümünde kullanılan orifis üzerinde oluşan fark basınç sürekli olarak takip edilmiş ve tüp üzerindeki regülatör ayarı sürekli olarak düzeltilmiştir. Bu sorun daha sonraki deneylerde bir iğne vana yardımı ile aşılmıştır. Deneyler 0-3,5 m³/h debi aralığında oksijen beslemesi gerçekleştirilerek yapılmıştır. Deney boyunca 3 tüp oksijen gazı tüketilmiştir. Oksijen beslemesi 12 saat boyunca yapılmıştır. Buna göre deney süresince ortalama 2,5 m³/h oksijen tüketimine denk gelmektedir. Debi ölçümleri sonucu alınan veriler ise ortalama 2,2 m³/h debi kullanımı olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.4'te gazlaştırma kanalı içinden geçen gazın sıcaklık dağılımları verilmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan ısıtıcı çiftlerin ölçüm aralığı 1200°C ile sınırlı olduğu için, sıcaklıklar bu değerleri aştığında ölçümler gerçekleşmemiştir. Deneyin başlangıcından 7 saat sonra önce Tr4, bundan yaklaşık 5 saat sonra ise Tr12 yüksek sıcaklıklar nedeni ile hasar görmüştür ve sıcaklık ölçümü alınamamıştır. Deney sonrası reaktör açıldığında bu iki ısıtıcı çiftin de fiziksel olarak hasarlanmış olduğu tespit edilmiştir.

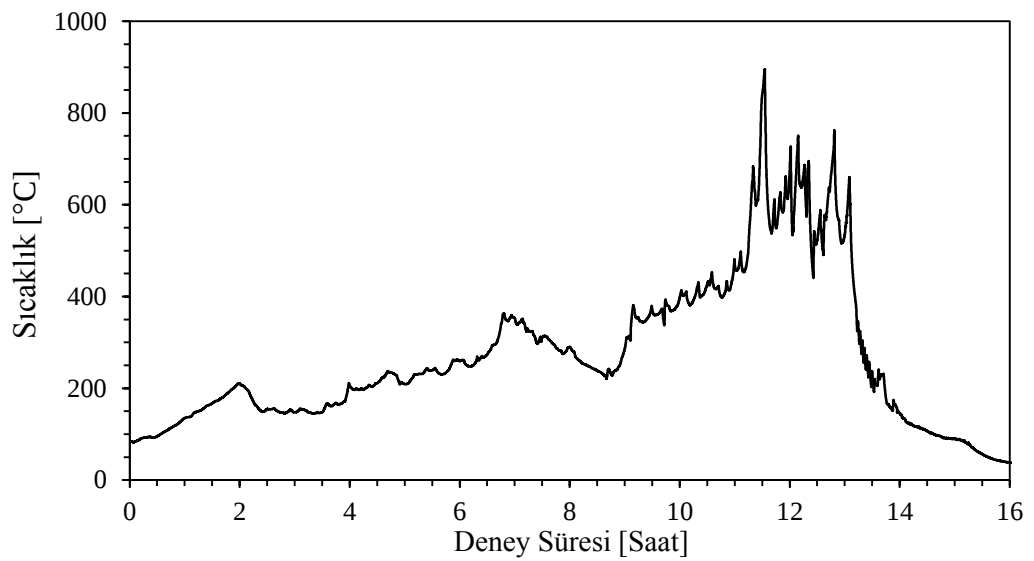


Şekil 4.4: Gazlaştırma kanalı içerisinde zamana bağlı sıcaklık değişimi.



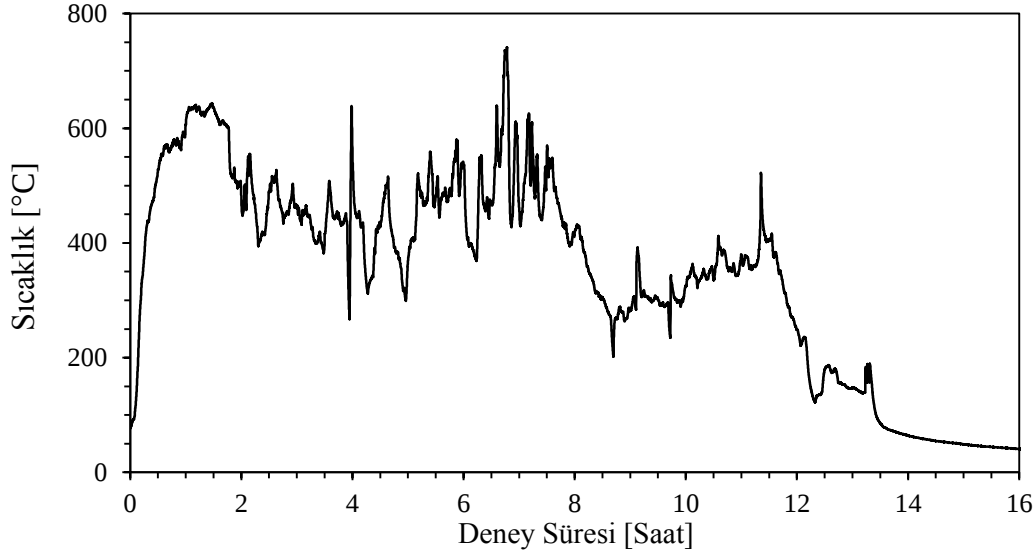
Şekil 4.5: Kömür içerisinde zamana bağlı sıcaklık değişimi.

Kömür içerisindeki sıcaklıklar (Tr3, Tr7, Tr11 ve Tr15), deney boyunca ölçülmüştür. Şekil 4.5'te bu sıcaklıklar irdelendiğinde, yanma önünün zamanla reaktör içerisinde ilerlediği görülmektedir. Deney sırasında Tr3 ısı çifti deney başlangıcından yaklaşık 8 saat sonra hasar görmüştür ve bu noktadan ölçüm alınamamıştır. Deney sonrası yapılan incelemelerde, söz konusu ısı çiftinin muhtemel bir çökme sonucu ve yüksek sıcaklıklarda malzemenin özelliğini kaybetmesine bağlı olarak kırılmış olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra Tr11 kodlu ısı çifti de nedeni anlaşılamayan bir sebep ile deneyin dokuzuncu saatinde sağlıklı ölçüm alamaz hale gelmiştir. Reaktör çıkışında, gazlaştırma ile üretilen gazın sıcaklıkları ise Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



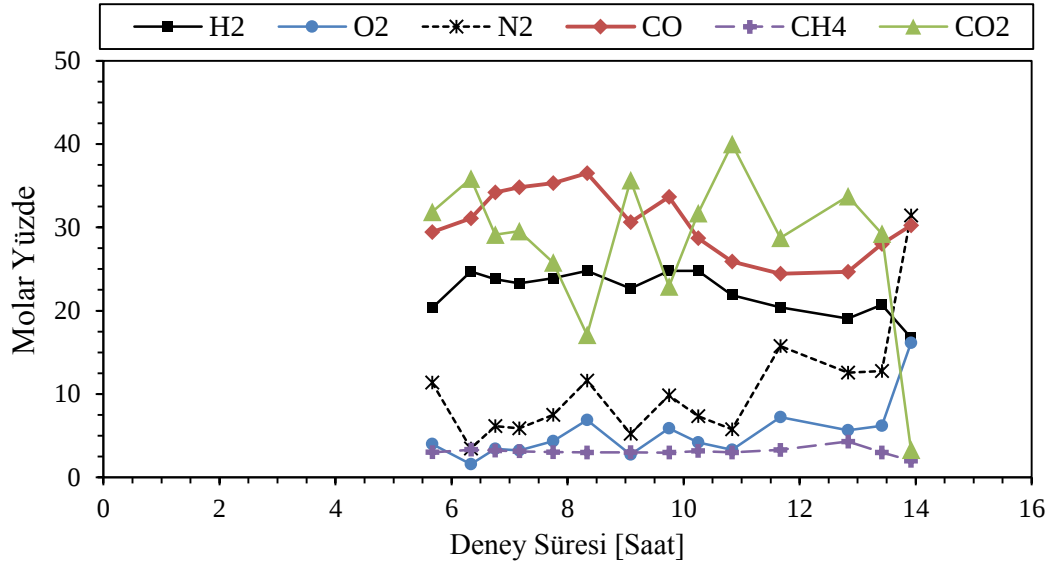
Şekil 4.6: Reaktör çıkışında gaz sıcaklığı.

Yakıcıda gazlaştırma ile üretilen yapay gazın yanması gerçekleştirildiği için burada yüksek sıcaklıklar beklenmektedir. Deneylerde ölçülen sıcaklıklar Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Oksijen beslenmeye başladıktan 1 saat sonra yakıcıda bulunan pilot alevi söndürülmüştür ve çıkan yapay gazın kendiliğinden yandığı gözlemlenmiştir. Bu da, reaktöründe gazlaştırmanın gerçekleştiğini ve yanıcı gazların deney boyunca açığa çıktığını kanıtlamaktadır.



Şekil 4.7: Yakıcıda ölçülen sıcaklık.

H₂S’den temizlenmiş gazdan, periyodik aralıklarla gaz örnekleri alınarak gaz kromatografi (GC) cihazında ölçümler yapılmıştır. Deney süresi boyunca, toplamda 14 adet örnekleme yapılmıştır. Her bir ölçüm için yaklaşık 30 dakikalık bir süreye ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 4.8’de yapay gazının bileşenlerinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, karbonmonoksitin ölçüm alınan zaman aralığında %25 ile %35 arasında değiştiği görülmektedir. Hidrojen oranı ise %20 ile %25 arasındadır. Bunların yanı sıra yapay gazın içerisinde ortalama %3 oranında metan gazı da tespit edilmektedir. Bu durum göstermektedir ki gazlaştırma sonucu elde edilen yapay gazın yaklaşık olarak yarısı yanıcı gazlardan oluşmaktadır. Geri kalan bölüm ise ağırlıklı olarak karbondioksittir. Ayrıca oksijen debisinin artışına ve deney tesisatında ya da örnekleme hattında bulunan kaçaklara bağlı olarak yapay gazın bileşiminde oksijen ve azota da rastlanmaktadır. Literatürde bulunan deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, elde edilen yapay gaz bileşiminin tatmin edici olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8: Gaz kromatografi kullanılarak elde edilen yapay gaz bileşimleri.

Deneyler O₂ beslemesinin başlamasından yaklaşık 12 saat sonra sonlandırılmıştır. Bu noktada gazlaştırılan ürünlerdeki yanıcı içeriğin bitmesi neticesi gaz yakıcıda yanma durmuş olup reaktördeki kömür sıcaklıkları ve gaz sıcaklıkları düşmüştür. Bunun üzerine oksijen beslemesi durdurularak, reaktörün 12 saat boyunca soğuması sağlanmıştır. Reaktör, kademe kademe sökülerek gazlaştırma süreci sonrası kömür bloğunun durumu incelenmiştir. Reaktör gazlaştırma kanalının deney boyunca açık kaldığı ve oyukun geliştiği tespit edilmiştir. Ayrıca deney esnasında yüksek sıcaklıklara ulaşılmış olması nedeniyle kömürün yer yer sinterleşmiş olduğu görülmektedir. Deney sonucunda kömür bloğunun görüntüsü ve oyuk oluşumu Şekil 4.9’da görülebilir.



Şekil 4.9: Deney sonucu oluşan oyukun görüntüsü.

4.2 İkinci Gazlaştırma Deneyinin Sonuçları

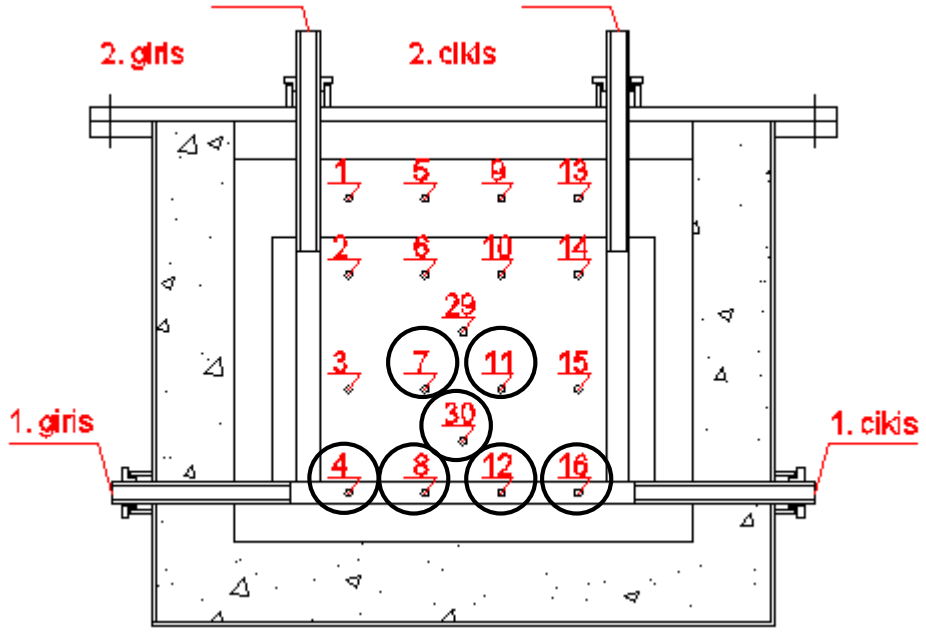
Çalışmada sonuçları verilen bir diğer deney ise 29 Temmuz tarihinde yapılmıştır. Bu deneyde ateşleme işleminden sonra 7 saat boyunca saf oksijen beslemesi, daha sonra 50 dakika boyunca oksijenle zenginleştirilmiş hava beslemesinden sonra su buharı ve oksijen karışımı beslemesi gerçekleştirilmiştir. Deney toplamda 14 saat sürmüştür.

Deneyde kullanılan kömür numunesi Şekil 4.10a'da gösterilmektedir. Reaktör içerisine yerleştirilen ana bloğun boyutları 52×38×22 cm'dir. Bloğun kütlesi 45 kg'dır. Ana blok yerleştirildikten sonra boş kalan kenarlara küçük parça ve toz halindeki kömürler yerleştirilerek reaktör içerisinde sıkıştırılmıştır. Boşlukların kömür ile kapatılmış durumu Şekil 4.10b'de verilmiştir. Ardından kömür üzerine ısıya dayanıklı tuğla koyulmuş ve arada kalan küçük boşluklar harç ile kapatılmıştır. Isıya dayanıklı tuğla üzerine taş yünü serilmiş ve son olarak sac levhalar kapatılarak reaktör içerisinde adyabatik koşullar sağlanmaya çalışılmıştır.



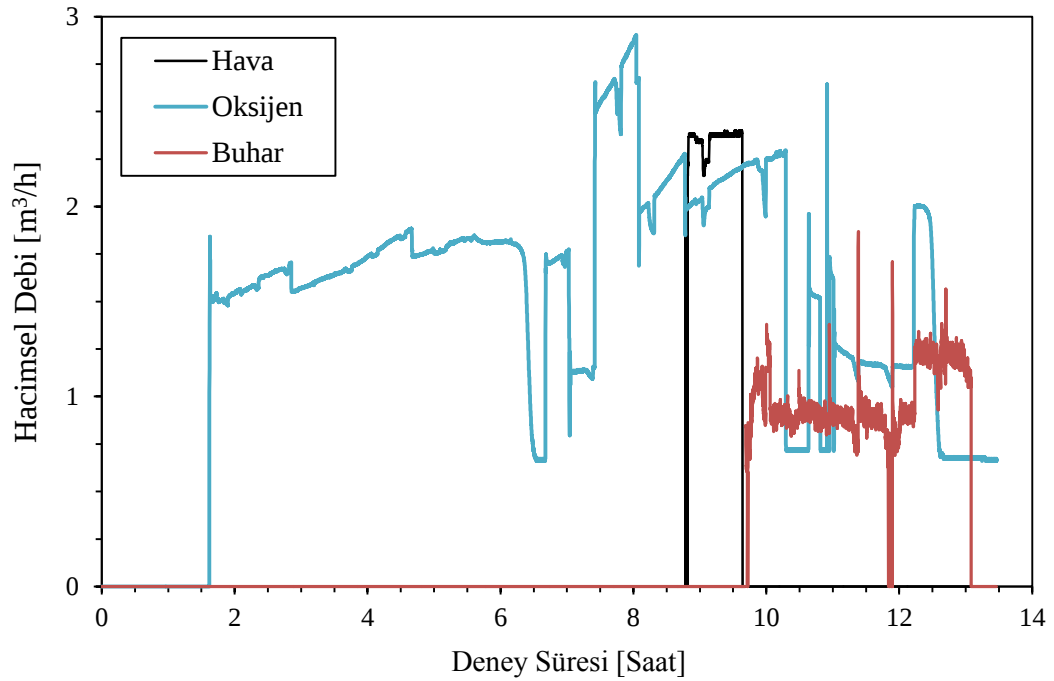
Şekil 4.10: a) Deneyde kullanılan kömür bloğu. b) Kömür ile doldurulan reaktör.

Kömür yerleştirildikten sonra 22 mm'lik matkap ucu ile gazlaştırma kanalı açılmıştır. Şekil 4.11'de reaktör içerisinde ölçüm alınan noktalar gösterilmektedir. Tr4, Tr8, Tr12 ve Tr16 gazlaştırma kanalı içerisinde bulunan noktalardır. Tr7, Tr11 ve Tr30 ise kömür gazlaştırma kanalının 5 cm üzerindedir ve deneyin başlangıcında kömür bloğunun içerisinde yer almaktadır.



Şekil 4.11: Reaktör içerisinde sıcaklık ölçüm noktaları.

Şekil 4.12’de hava, oksijen ve su buharının besleme debileri zamana bağlı olarak verilmiştir. Deneye propan alevi yardımıyla ateşleme işlemi yaparak başlanmıştır. Tr7, Tr11 ve Tr30 noktalarındaki sıcaklıklar 50°C seviyesine geldiği zaman ateşleme kesilmiş ve 1,5 m³/h debi ile saf oksijen beslenmeye başlanmıştır. Ateşleme, yaklaşık olarak 1 saat 40 dakika sürmüştür. Saf oksijen beslemesi yaklaşık 7 saat boyunca devam etmiştir.

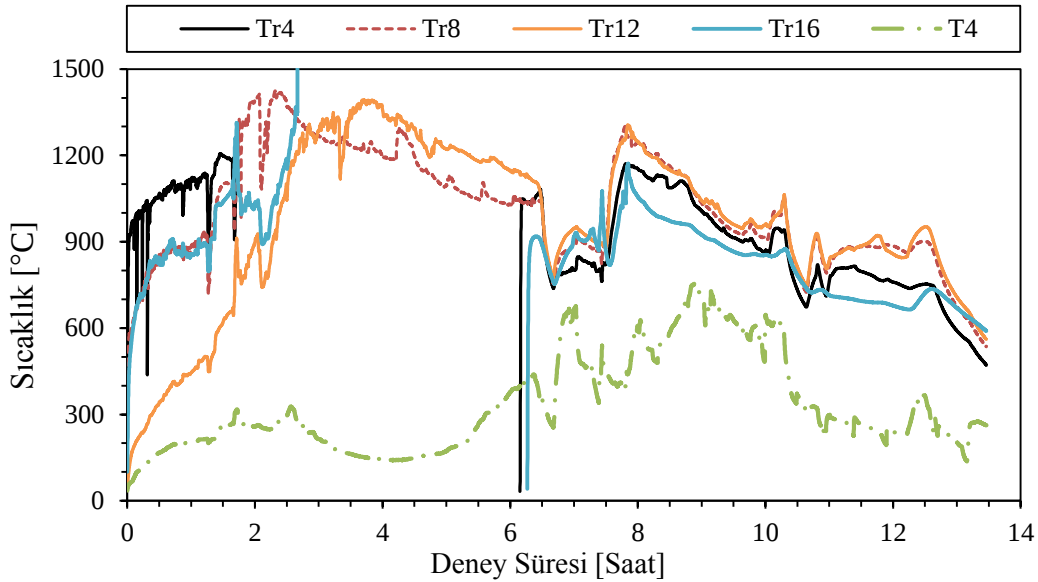


Şekil 4.12: Deneyde kullanılan gazlaştırıcı besleme debileri.

Bu sürenin sonunda deneye O_2 /Hava oranı 1:1 olacak şekilde ilave hava beslemesi yapılarak 50 dakika boyunca devam edilmiştir. Burada amaç artan besleme debisinin yapay gazın debisine ve içeriğine etkisini incelemektir. Yapay gaz bileşiminde yaşanan olumsuzluklar ve reaktör içerisinde yaşanan sıcaklık düşüşü doğrultusunda hava beslemesi durdurularak saf oksijen kullanımına geri dönmüştür.

Deneyin son aşamasında ise yaklaşık 1 kg/h debi ile su buharı beslemesi başlatılmıştır. Burada oksijen beslemesi kesilmemiş ve yaklaşık 2,2 m³/h debi ile beslenmeye devam etmiştir. Bu süreçte gaz kromatografi cihazı ile örnek alınmaya devam edilmiş ve yüksek oranda oksijen tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak oksijen debisi, su buharı beslemesinin yarattığı sıcaklık düşmesini dengeleyecek şekilde azaltılarak deney tamamlanmıştır.

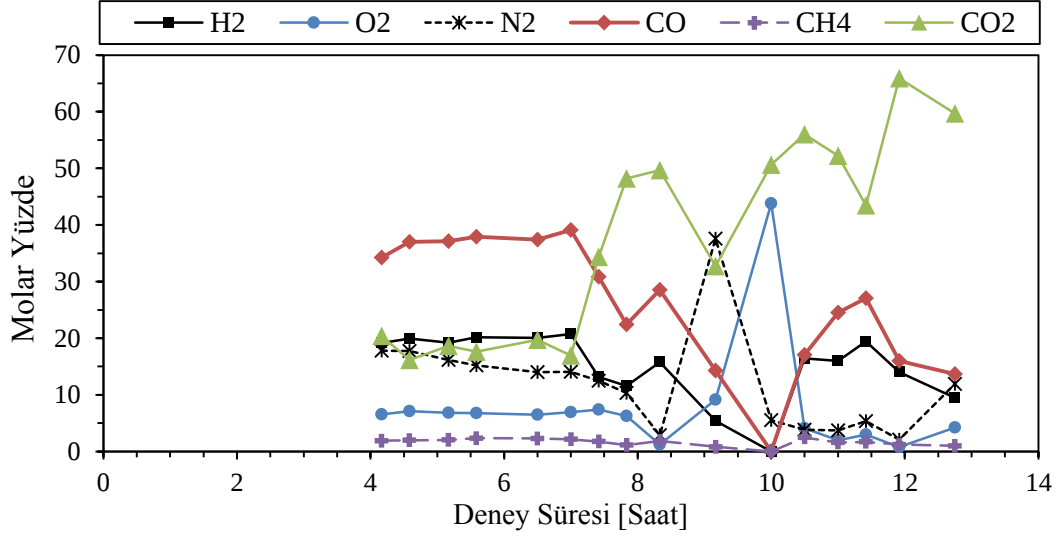
Şekil 4.13'te reaktör içerisinde sıcaklık dağılımı verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi gazlaştırma kanalı içerisinde gözlemlenen yüksek sıcaklıklara bağlı olarak Tr4, Tr8 ve Tr16 deney esnasında ölçüm aralıklarının dışına çıkmış ve Tr4 ile Tr16 hasar görmüştür. Hasar görmesi ısı çiftleri, reaktör içerisinde ölçülen sıcaklık değerlerinin düşmesi ile birlikte yenileri ile değiştirilmiş ve böylece söz konusu noktalardan ölçüm alınmaya devam edilmiştir.



Şekil 4.13: Gazlaştırma kanalı boyunca sıcaklık ölçümleri.

Deney boyunca 16 kez yapay gazının bileşimi gaz kromatografi cihazı ile ölçülmüştür. Şekil 4.14'te yapay gazın bileşenlerinin zamana bağlı değişimi verilmektedir. Deneyin dört ile yedinci saatleri arasında yapılan analizlerin sonucunda elde edilen yapay gaz bileşiminin oldukça kararlı olduğu görülmektedir. Bu zaman diliminde yapay gaz

içerisindeki karbonmonoksit miktarı ortalama olarak %40 gibi yüksek bir değerde çıkmaktadır. Bunun yanı sıra hidrojen miktarı ise %20 seviyesinin hemen üzerinde seyretmektedir. Ayrıca yaklaşık olarak %3 metan gazı da tespit edilmiştir. Deneyin ilk 7 saatlik bu bölümünün gazlaştırma açısından oldukça verimli geçtiği söylenebilir.



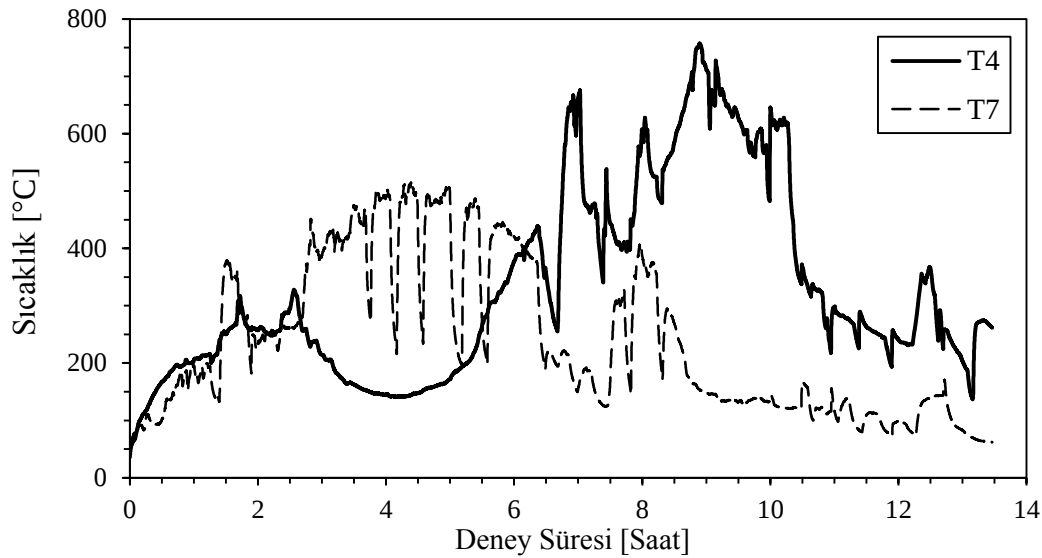
Şekil 4.14: Yapay gaz bileşiminin zamana göre değişimi.

Deneyin yedinci saatinde oksijen debisi yarıya düşürülerek yaklaşık 1 m³/h değerinde beslenmeye başlanmıştır. Bu değişikliğin ardından yapılan gaz kromatografi analizi sonucunda H₂, CO ve CH₄ oranlarında önemli derecede düşüş, CO₂ oranında ise artış gözlemlenmiştir. Bunun üzerine oksijen besleme debisi 2,5 m³/h çıkarılmıştır. Yapılan müdahalenin ardından yapılan gaz ölçümü incelendiğinde, H₂, CO ve CH₄ oranlarında düşüş, CO₂ oranında ise artış eğiliminin devam ettiği görülmüştür. Alınan sonuçlardan sonra oksijen debisi 2 m³/h olarak yeniden ayarlanmış ve sonucunda H₂ ve CO oranlarında artış gözlemlenmiştir. Deneyin yaklaşık olarak dokuzuncu saatinde gerçekleştirilen O₂/Hava oranı 1:1 olacak şekilde oksijence zenginleştirilmiş hava beslemesi sonucunda H₂ ve CO oranlarında düşüş gözlemlenmiş, O₂ oranında ise artış gözlemlenmiştir.

Burada deneyin yaklaşık 10 saat boyunca devam etmesi ve büyük bir bölümünün saf oksijenle olmasının tepkimelerin hızlı olarak gerçekleşmesine, dolayısı ile yüksek sıcaklıklara bağlı olarak kömür içerisinde bulunan uçucuların ayrılarak tükenmesine ve kömürün nemini kaybetmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Bu aşamadan sonra su buharı beslenmesine karar verilmiştir. İlk su buharı beslemesi oksijen azaltılmadan sadece 1 kg/h'lık kütleli debi ile yapılmış ve yapılan analiz sonucu hemen hemen sadece O₂ ve CO₂ tespit edilmiştir. Bu noktada oksijen beslemesi kısılmış ve sadece

su buharı beslenmeye başlanmıştır. Böylece toplamda %33,5 oranında hidrojen ve karbonmonoksit elde edilmesi sağlanmıştır. Reaktör içerisindeki sıcaklıkların düşmesi nedeni ile oksijen debisi bu düşüşü dengeleyecek şekilde ayarlanmış ve su buharı ile birlikte beslenmeye başlanmıştır. Deneyin bu aşamalarında gaz kromatografi cihazına örnek alımı düşük debilerinde de etkisi ile oldukça zorlaşmıştır. Bir noktadan sonra yakıcıda görülen alev de sönmüş ve buna bağlı olarak deney sonlandırılmıştır.

Şekil 4.15'te reaktör çıkışı sıcaklıkları ile yakıcıda okunan sıcaklık birlikte verilmiştir. Yakıcıdaki sıcaklığa (T7) bakıldığında deneyin 3-6,5 saatleri arasında sıcaklığın 400-500°C arasında olduğu görülmektedir. Bu saatler arasında yakıcıda sarı ve kuvvetli bir alevin varlığı gözlemlenmiştir. Gaz kromatografi sonuçlarına bakıldığında bu sırada yapay gaz bileşiminde %30-35 oranında karbonmonoksit olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca deneyin 8-12 saatleri arasında yapılan su buharı beslemesi sonucu açığa çıkan yapay gazın yanması incelendiğinde mavi bir alevin varlığı tespit edilmiştir. Buna rağmen sıcaklığın beklenen seviyelerde okunamamasının sebebi olarak yapay gaz çıkış debisinin 3-6,5 saatleri arasındaki debiye göre daha düşük olması ve ayrıca buna bağlı olarak oluşan alevin yakıcı içerisinde bulunan ısı çiftin bulunduğu noktaya kadar ulaşamaması olduğu söylenebilir.



Şekil 4.15: Reaktör çıkışında ve yakıcıda sıcaklık dağılımı.

Deney sonrasında yapılan incelemelerde reaktör içerisinde yanmamış halde parça kömüre rastlanmamıştır. Önceki deneyeler ile kıyaslandığında sinterleşmiş yapıya daha az rastlanmıştır. Kömürün parçalanması ve çökmesi kömür bloğu içerisinde oluşmuş olası bir oyugun varlığının tespitini engellemiştir.

4.3 Üçüncü Gazlaştırma Deneyinin Sonuçları

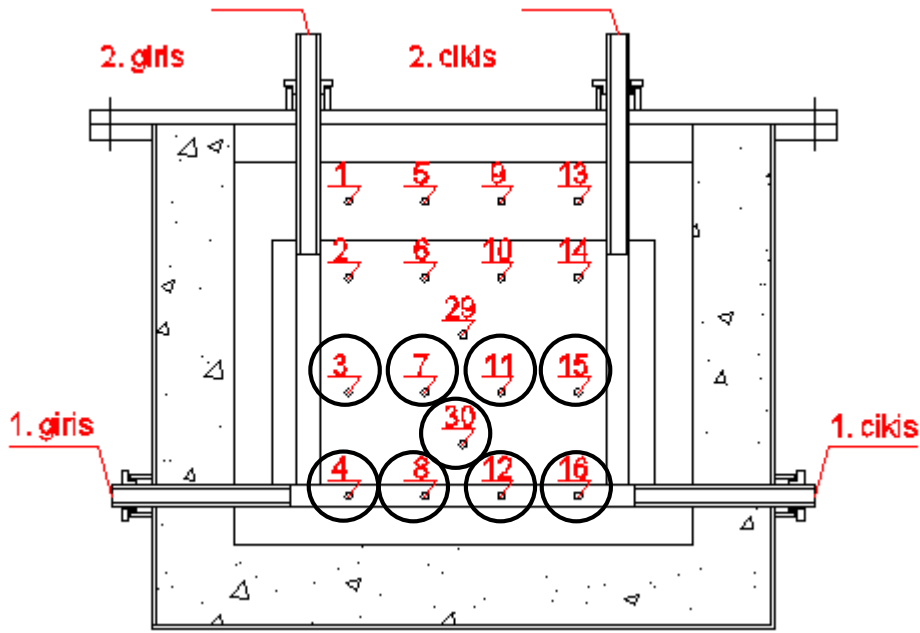
Çalışmada sonuçları verilecek olan son deney 26 Ağustos tarihinde yapılmıştır. Bu deneyde ateşleme işleminden sonra yaklaşık 10 saat 45 dakika boyunca saf oksijen beslemesi, daha sonra 60 dakika boyunca oksijen ile birlikte su buharı beslemesi birlikte gerçekleştirildi.

Bu deneyde kullanılan kömür bloğu Şekil 4.16a'da gösterilmiştir. Deney numunesinin hazırlanmasında öncelikle reaktör içerisine sığacak boyutlarda kömür bloğu elde edilmiştir. Reaktör içerisine yerleştirilen ana bloğun boyutları 52×34×25 cm'dir. Bloğun kütlesi 45 kg'dır. Ana blok yerleştirildikten sonra boş kalan kenarlara küçük parça ve toz halindeki kömürler yerleştirilerek reaktör içerisinde sıkıştırılmıştır. Reaktörün kömür ile doldurulduğu durum Şekil 4.16b'de gösterilmektedir. Reaktör içerisinde adyabatik koşulların sağlanabilmesi amacı ile daha önce de anlatıldığı üzere kömürün üzeri ısıya dayanıklı tuğlu ile kapatılmış ve seramik yünü serilmiştir. Kömür yerleştirildikten sonra 22 mm'lik matkap ucu ile gazlaştırma kanalı açılmıştır.



Şekil 4.16: a) Deneyde kullanılan kömür bloğu. b) Reaktörün kömür ile doldurulması.

Şekil 4.17'de reaktör üzerinde ölçüm alınan noktalar gösterilmektedir. Tr4, Tr8, Tr12 ve Tr16 kanal içerisindeki sıcaklıkları göstermektedir. Tr3, Tr7, Tr11, Tr15 ve Tr30 kömür içerisindeki sıcaklıkları göstermektedir.

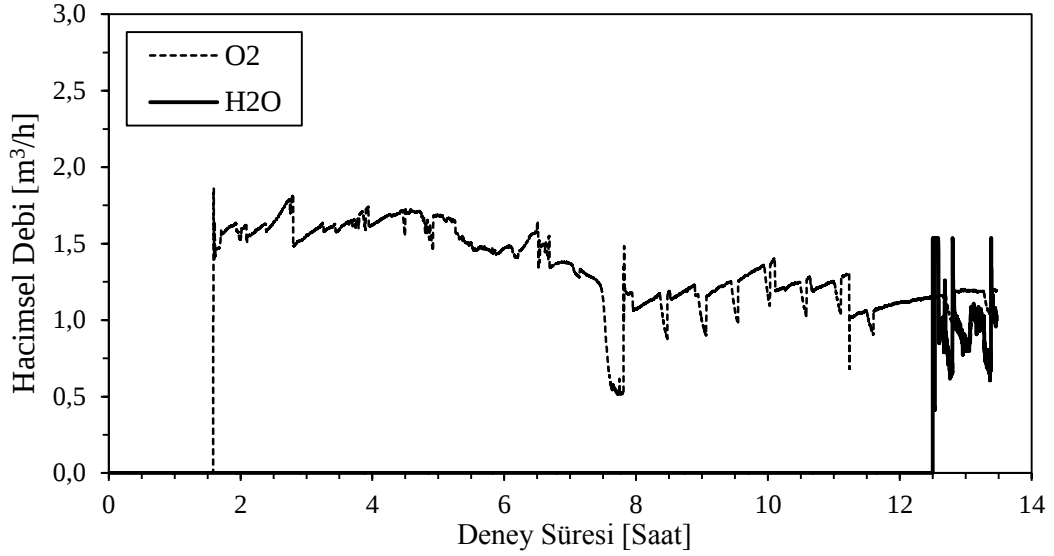


Şekil 4.17: Reakör içerisinde sıcaklık ölçümü alınan noktalar.

Deneye propan alevi yardımıyla ateşleme işlemi yapılarak başlanmıştır. Tr3, Tr7 ve Tr30 noktalarındaki sıcaklıklar 80°C mertebelerine geldiği zaman (yaklaşık 1 saat 45 dakika) ateşleme kesilmiş ve 1,5 m³/h debi ile saf oksijen beslenmeye başlanmıştır. Saf oksijen ile yaklaşık 10 saat 45 dakika boyunca gazlaştırma işlemi devam etmiştir. Deneyin bu aşaması boyunca O₂ debisi 1,5 m³/h debide tutulmaya çalışılmış, deneyin 8. saatinden sonra ise debi 1-1,2 m³/h aralığında olacak şekilde çalışılmıştır.

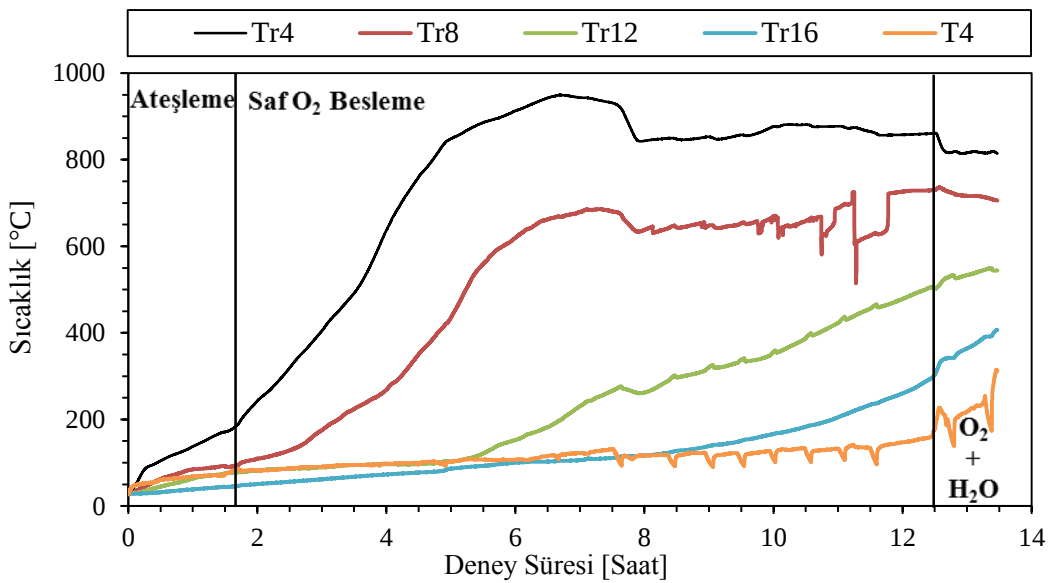
Saf O₂ beslenerek yapılan son gaz kromatografi sonucunda H₂, CO ve CH₄ oranlarında azalma görülmüştür. Sıcaklıkların 900-1000°C seviyelerinde olmasının da uygunluğu düşünülerek yapay gaz içerisinde bulunan yanıcı gaz miktarını arttırabilmek amacı ile sisteme su buharı beslemesi yapılmaya başlanmıştır. Su buharı debisi yaklaşık 1 kg/h olarak ayarlanmıştır. Aynı zamanda su buharının yanında 1,2 m³/h debi ile O₂ beslemesi sürdürülmüştür. Deney bitirilmeden önce işlem bu şekilde bir saat daha devam etmiştir. Besleme debilerinin zamanla değişimini gösteren grafik Şekil 4.18’de verilmiştir.

Deneyde yaklaşık 17 m³ saf O₂ tüketilmiştir. Oksijen beslemesinin 12,5 saat süreyle sürdüğünü düşünülür ise deneyde ortalama 1,35 m³/h’lik O₂ tüketimi gerçekleşmiş olduğu sonucuna varılır. Bu deneyde herhangi bir hava beslemesi yapılmamıştır.



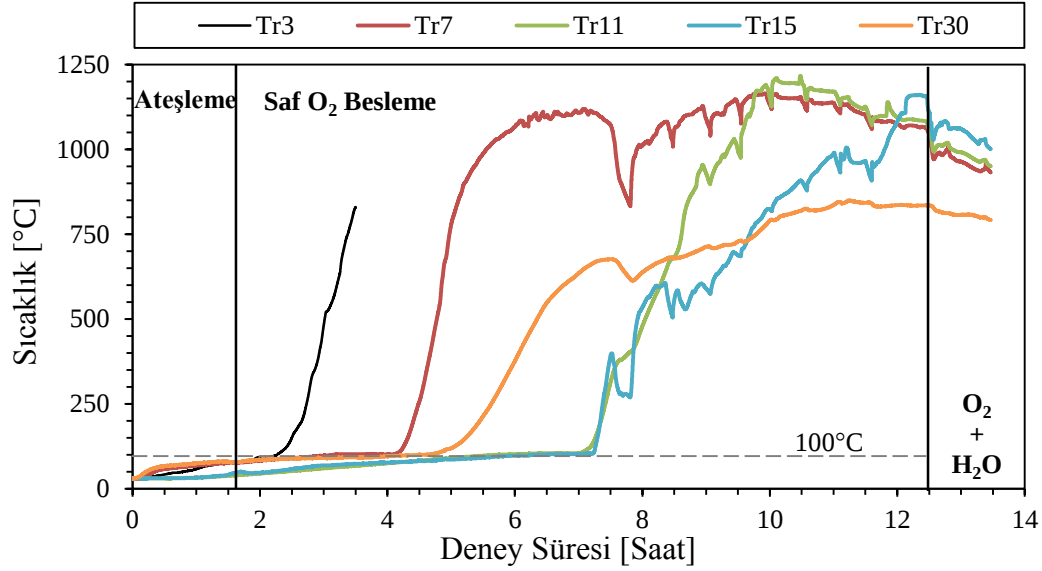
Şekil 4.18: Deneyde kullanılan gazlaştırıcı besleme debileri.

Şekil 4.19'da gazlaştırma kalını seviyesinde bulunan sıcaklık dağılımı verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi maksimum sıcaklık 950°C seviyelerine gelmiştir. Önceki deneylerde karşılaşılan yüksek sıcaklıklara bu deneyde erişilmediği görülmektedir. Bunun iki nedeni olduğu düşünülmektedir. İlk etken, ısı çiftlerinin tam olarak gazlaştırma kanalı içerisine denk gelmemiş olmasıdır. Bu durum deney hazırlığı sırasında yapılan bir hata sonucu gerçekleşmiştir. İkinci etken ise gazlaştırma süreci devam ederken kömürün tavanından parçalanarak kopan kömür parçalarının, ısı çiftlerinin üzerini kaplaması ve dolayısı ile ısı çiftlerinin oyuk gelişimine bağlı olarak gazlaştırma kanalına açılmasına engel olmasıdır.



Şekil 4.19: Gazlaştırma kanalı ve reaktör çıkışında sıcaklık dağılımı.

Kömür içerisinde, gazlaştırma kanalının 5 cm üzerinde bulunan noktalarda sıcaklık dağılımının Şekil 4.20’de verilmiştir. Gazlaştırma kanalında gözlemlenmeyen yüksek (1000°C üzeri) sıcaklıklar kömür içerisinde bulunan Tr3, Tr7, Tr11 ve Tr15 ısıl çiftlerinde görülmüştür. Buna bağlı olarak, daha önceki deneylerde de olduğu üzere Tr3 hasar görmüş ve ölçüm alamaz hale gelmiştir.

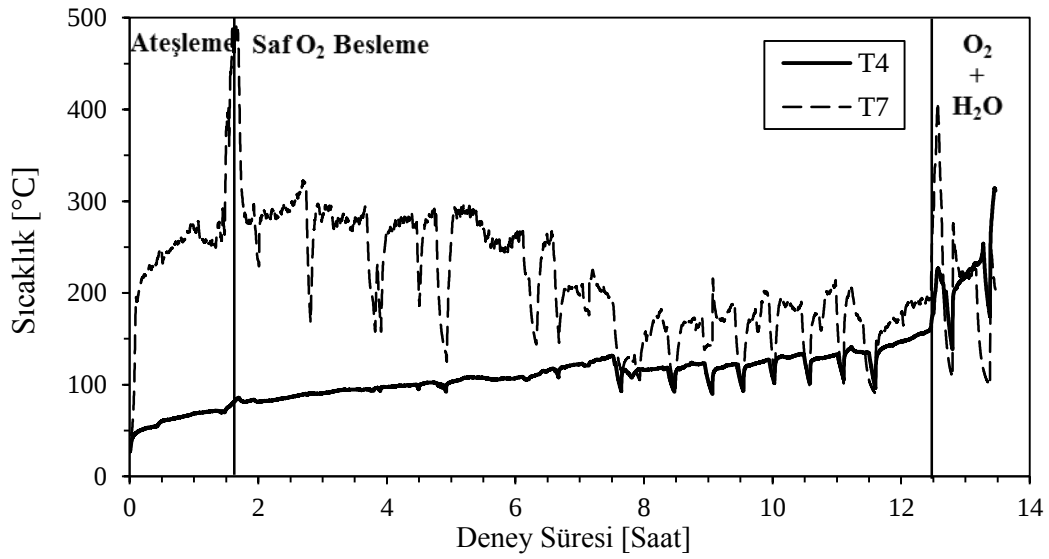


Şekil 4.20: Kömür bloğu içerisinde sıcaklık dağılımı.

Kömür içerisinde sıcaklık dağılımının incelenmesi, oyuk oluşumunu ve kuruma bölgesinin ilerlemesini görmek için de kullanılabilir. Sıcaklıkların zaman içerisinde değişimleri incelendiğinde, her bir noktanın temel olarak üç farklı rejim gösterdiği söylenebilir. Bunlardan ilki, 100°C'ye kadar sıcaklıkların yavaş bir şekilde arttığı evredir. Bu evrede kömür nemlidir ve suyun buharlaşıyor olması nedeni ile sıcaklığı 100°C'nin üzerine çıkamamaktadır. İkinci evrede ise sıcaklıkların ani bir şekilde yükseldiği gözlemlenmektedir. Bu evrede kömür tamamen kuru bir durumdadır ve tepkimeler sonucu üretilen ısı kömürün sıcaklığını arttırmaktadır. Ayrıca bu noktada yanma önünün de ölçüm alınan noktaya yaklaştığı söylenebilir. Üçüncü ve son evrede ise yanma önü sıcaklık ölçümünün yapıldığı noktaya ulaşarak bu bölümün gazlaştırma kanalına açılmasına sebep olur. Bu noktadan sonra ölçülen değerler reaktör içerisindeki gaz sıcaklıklarına oldukça yakın değerlerdir.

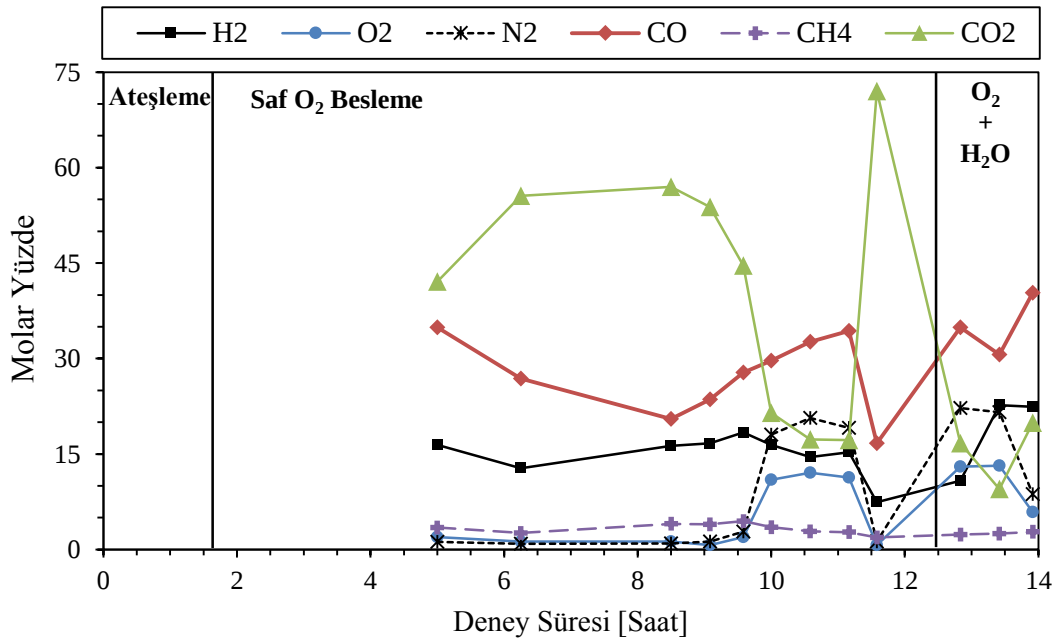
Şekil 4.21'de reaktör çıkışında ve yakıcıdaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Deney başladıktan 1 saat sonra, ateşleme süreci devam ederken yakıcıda pilot alev kapatılmıştır ve açığa çıkan yapay gaz kendiliğinden yanmıştır. Yani yapay gaz yanıcı

gaz içermektedir. Burada ateşleme sırasında uçucuların açığa çıktığı düşünülmektedir. Elde edilen yapay gazın kendiliğinden yanması 13 saat süreyle devam etmiştir.



Şekil 4.21: Reaktör çıkışında ve yakıcıda sıcaklık dağılımı.

Deney boyunca yapay gazının bileşimi 12 kere gaz kromatografi cihazı ile ölçülmüştür. Alınan sonuçlar Şekil 4.22’de verilmiştir. Burada O₂ debisi 1-1,5 m³/h arasında değiştirilmiştir. Oksijen besleme debisi, gaz kromatografi sonuçlarına bağlı olarak 1-1,5 m³/h arasında değiştirilmiştir. Bu süreç içerisinde elde edilen yapay gazın içerisindeki karbonmonoksit oranının %20-35 arasında, hidrojen oranının ise %15-20 seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Metan ise ortalama %3 oranında gözlemlenmiştir.



Şekil 4.22: Gaz kromatografi ölçümlerine göre yapay gaz bileşiminin değişimi.

Reaktör içerisine su buharı beslenmesi kararı ise yapılan deneyin on birinci saatinde yapılan GC analizinde CO₂ oranının %70 seviyesine çıkması ve H₂ oranının %10'un altına inmesi sonrası verilmiştir. Sisteme su buharı beslenerek H₂ oranında artış sağlamak CO₂ oranını ise düşürmek amaçlanmıştır. Su buharı beslemesi gerçekleştirildikten sonra yapılan gaz analizlerinde hidrojen oranının %25'in üzerinde çıktığı görülmüştür. Bu değer, deney boyunca gözlemlenen en yüksek hidrojen oranıdır. Yapay gaz içerisinde bulunan CO miktarı da %35 seviyesine geri yükselmiştir. Ayrıca CO₂ oranı da yeniden %20 seviyesine düşürülmüştür. Böylece sisteme su buharı verilerek hidrojen gazının oranında artış sağlama amacına ulaşılmıştır. Uygun şartlarda yapılan su buharı beslemesinin elde edilen yapay gaz kalitesini önemli derecede arttırabildiği kanıtlanmıştır. Deney, yakıcıda bulunan alevin kaybedilmesine bağlı olarak (yani yapay gaz debisinin düşmesi), ateşleme dâhil 14 saat deney süresi sonunda sonlandırılmıştır.

5. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Yapılan çalışmaların doğruluğunun denetlenmesi amacı ile hem deneyden alınan verilerin, hem de kurgulanan matematik model yardımı ile alınan sonuçların, birbirleri ile ve literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmaları yapılmıştır.

5.1 Deney Sonuçları ile Literatür Çalışmalarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, Stanczyk v.d tarafından iki ayrı çalışmadan gerçekleştirilen toplam üç adet gazlaştırma deneyinin sonuçları ile yürütülen çalışma kapsamında gerçekleştirilen üç farklı deneyin sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneylerin farklı aşamalarında elde edilen ortalama yapay gaz bileşimleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması.

Çalışma Bilgileri	Deney No.	Aşama	Yapay Gaz Bileşenleri (%Hacim)						Isıl Değer [MJ/Nm ³]	
			CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂		
Stanczyk v.d	2010 [41]	O2 - 1	7,0	16,1	1,3	64,9	3,6	7,0	3,09	
		Buhar	4,8	46,3	4,4	39,5	0,6	2,4	7,18	
		O2 - 2	9,9	26,4	2,7	54,0	1,8	4,7	5,07	
	2011 [42]	O2	6,2	19,2	1,7	63,6	2,0	7,0	3,49	
		Hava	1,3	2,5	0,2	12,1	5,7	78,2	0,49	
		O2/Hava	6,3	23,1	2,3	49,4	1,5	16,4	4,18	
		O2	33,2	31,5	3,2	27,9	0,7	3,2	8,58	
		Hava	10,3	11,8	2,8	14,7	0,7	59,6	3,63	
		O2/Hava	17,3	18,7	4,2	23,0	0,6	35,9	5,74	
Bu Çalışma	2015	1	O2	30,6	22,7	3,2	30,1	4,5	8,8	7,46
		2	O2 -1	37,1	19,9	2,1	18,2	6,8	15,8	7,59
			O2 -2	27,3	13,5	1,6	44,1	5,0	8,6	5,48
			O2/Hava	14,3	5,4	0,8	32,7	9,1	37,6	2,68
			O2/H2O	21,2	16,5	1,7	54,4	2,5	3,8	5,07
		3	O2 - 1	26,7	16,1	3,7	50,6	1,4	1,4	6,44
			O2 - 2	32,2	15,4	3,0	18,6	11,5	19,3	6,80
			O2/H2O	35,3	18,6	2,5	15,4	10,7	17,5	7,36

Sonuçlar incelenecek olursa, Stanczyk v.d tarafından yapılan çalışmalarda, hidrojen oranının oldukça yüksek seviyelere çıkabildiği görülmektedir. Bu çalışmalarda elde edilen en yüksek hidrojen oranı 2010 yılında gerçekleştirilen deneyde, gazlaştırıcı

olarak yalnızca su buharı beslemesi yapıldığında %46,3 olarak elde edilmiştir. Fakat çalışmanın yazarları tarafından bu süreç içerisinde kömür bloğu sıcaklıklarının oldukça düştüğü ve deneyin sonlanabilme riski ile karşılaşıldığı bildirilmiştir. Bu nedenle söz konusu kalitede yapay gazın sürdürülebilir bir şekilde elde edilebileceği söylenemez.

İncelemeye devam edilirse, Stanczyk v.d tarafından yapılan deneyler sonucu elde edilen yapay gazın içeriğinde hidrojen oranının neredeyse her zaman karbonmonoksit oranından fazla olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde ise durum tam tersidir. Deneyler esnasında çoğu zaman hidrojen üretiminin sağlanmasına zorluklar yaşanmıştır.

Bu durumun nedeni, Stanczyk v.d tarafından yapılan çalışmalarda kullanılan kömürün özellikle neminin oldukça yüksek olması ve sabit karbon miktarının düşük olması olarak tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan her iki kömürün de madenden çıkarıldıkları durumları ile yapılan analiz yaklaşık analiz sonuçları Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Buradan da görüleceği üzere Stanczyk v.d tarafından deneylerde kullanılan kömür, %53 gibi çok yüksek bir nem oranına sahiptir. Ayrıca sabit karbon miktarının da oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.2: Deneylerde kullanılan kömürlerin karşılaştırılması [41][65].

Analiz Tipleri	Bu Çalışmada	Stanczyk v.d [41]
Nem	25,17	53,0
Kül	17,95	4,7
Uçucu Madde	28,74	23,6
Sabit Karbon	28,14	17,7

Deneyler boyunca sıcaklık değişimleri incelenecek olur ise, literatürde karşılaşılan sıcaklık değerleri bu çalışma çerçevesinde gerçekleştirilen deneylerde karşılaşılan sıcaklıkların birbirleri ile tutarlılık gösterdiği görülmektedir. Yapılan çalışmada gazlaştırma kanalı sıcaklıklarının genel olarak literatürde karşılaşılan değerlerden bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum gazlaştırma ajanı olarak saf oksijen kullanılıyor olması ve besleme debisi ile ilgili bir durum olabilir.

Genel olarak bakıldığında bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerin başarılı oldukları söylenebilir. Yapılan deneyler, literatürde karşılaşılan durumlara benzer sonuçlar doğurmuştur. Ayrıca yapılan deneyler kullanılan gazlaştırma ajanları, besleme debileri ve kömür sıcaklığı gibi parametrelere duyarlı davranmıştır.

5.2 Deney Sonuçları ile Teorik Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

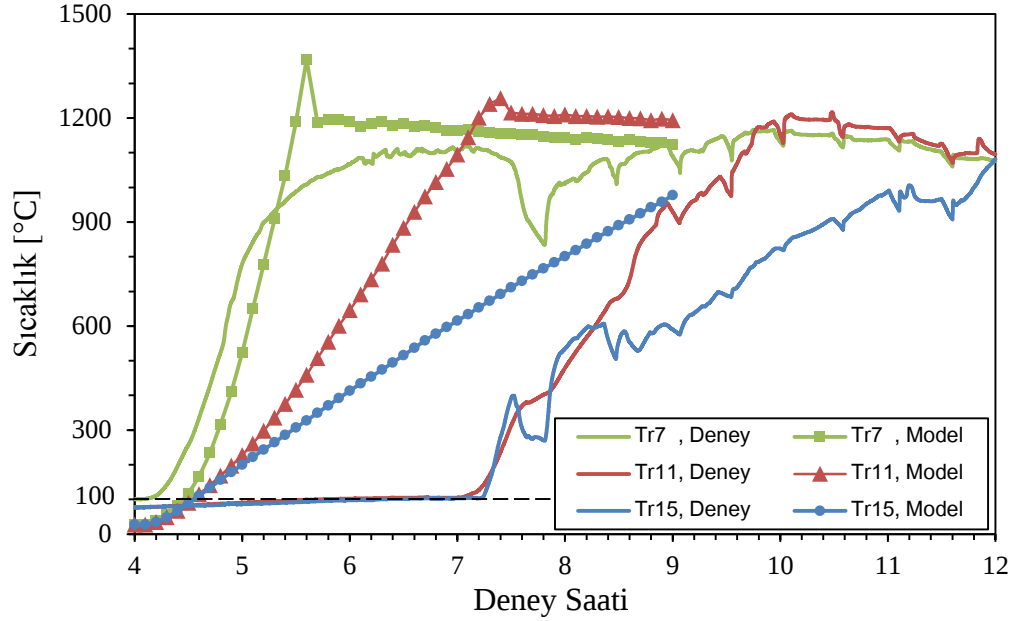
Matematik modelin geliştirilmesinde faydalanılan ve tasarımı etkileyen asıl etken, kurulan deney düzeneğidir. Bu nedenle matematik model sonuçlarının, kurulan düzeneğe ile yapılan deneyler ile karşılaştırılması doğru olacaktır. Yapılan deneyler arasında oksijen beslemesinin en kararlı şekilde 3 no'lu deneyde yapılmış olması nedeni ile karşılaştırma amacı ile bu deneyin verileri kullanılacaktır. Karşılaştırma için kullanılan matematik model verileri ise, $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ile saf oksijen beslemesi yapılan analizin sonuçlarıdır.

Matematik model çalışmaları ile yapılan analizler, toplamda 5 saatlik bir sürecin benzetimini kapsamaktadır. Oysaki deneyler 12 saatten fazla sürebilmektedir. Ayrıca deneyler boyunca farklı debi ve gazlaştırma ajanlarının etkilerini görebilmek amacı ile parametre değişiklikleri yapılmaktadır. Bu nedenlerle matematik model sonuçları ile deney sonuçları, zaman ekseninde tam olarak birbirleri ile oturamamaktadırlar. Bunun yanı sıra, matematik modelde kömürün ısınma süreci bulunmamakta, bu süreç başlangıçta yapılan yüksek sıcaklık tanımlaması ile sağlanmaktadır. Deney şartlarında ise kömürün ısınması zaman almaktadır. Yukarıda belirtilen nedenler dolayısı ile matematik model sonuçlarının karşılaştırılması, deneyin dördüncü saatinden başlamaktadır.

Reaktör içerisinde, gazlaştırma kanalının 5 cm üzerinde alınan sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması Şekil 5.1'de verilmiştir. Karşılaştırmaya deney sırasında hasarlanarak veri alamaz hale geldiği için Tr3 ısı çifti eklenmemiştir. Tr7 ısı çiftinin okuduğu değerler ile matematik modelde aynı noktada sıcaklıkların değişimi incelendiğinde, sıcaklıkların artış hızının doğru tahmin edildiği görülmektedir. Benzer olarak Tr11 ve Tr15 noktalarında da deney sonuçları ile model sonuçlarının zamanda gecikmeli, ancak birbirlerine paralel ve benzer eğimlerde seyrettiğini görmek mümkündür. Model sonuçlarında gözlemlenmeyen bu gecikmenin nedeni, kömür içerisinde bulunan nemin buharlaşmasıdır. Daha önce Bölüm 4.3'te de açıklandığı gibi, kömür içerisindeki sıcaklıkların başlangıçta oldukça yavaş bir şekilde arttığı, 100°C 'de bir süre durduğu, daha sonra ise hızlı bir artışa geçtiği görülmektedir.

Sıcaklıkların en yüksek noktalarına ulaştıktan sonra izledikleri eğilimler incelenecek olursa, yapılan modelleme sonuçlarının, deney sonuçlarında gözlemlenen birkaç özelliği doğru tahmin ettiği görülmektedir. Bunlardan ilki, bir noktada en yüksek

sıcaklık seviyesine ulaşıldıktan sonra sıcaklıklarda yavaş bir düşüşün gözlemlenmesidir. Bu durum Tr11 noktası üzerinden rahatça doğrulanabilir. Bir diğer nokta ise, Tr11 noktasındaki sıcaklığın, Tr7 sıcaklığının yaklaşık 50°C üzerine çıkmasıdır.

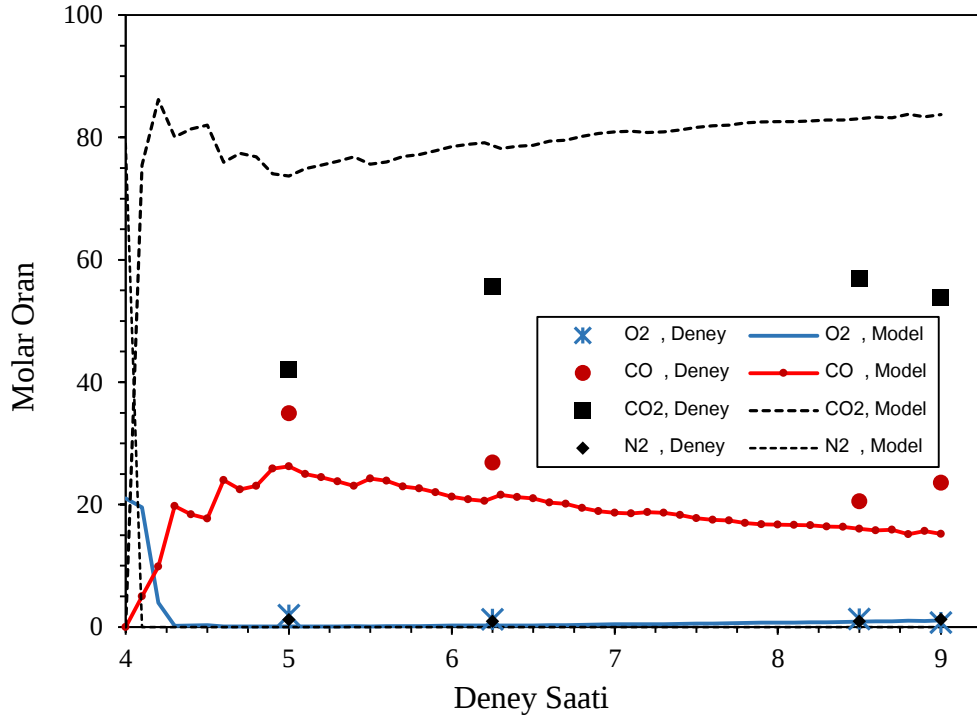


Şekil 5.1: Matematik model çalışmaları sonucu elde edilen kömür içerisindeki sıcaklıklarının 3 no'lu deney sonuçları ile karşılaştırılması.

Modelleme çalışmaları sonucu elde edilen yapay gaz bileşiminin deney sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 5.2'de verilmiştir. Grafik incelenecek olursa, modelleme çalışmalarında karbonmonoksit oranının düşük, karbondioksit oranının ise oldukça yüksek tahmin edildiği gözlemlenmektedir. Bu durumu meydana getiren iki etmen olabileceği düşünülmüştür. İlk sebep olarak, karbonun oksijen ile eksik yanması sonucu ortaya çıkabilecek karbonmonoksit hesaba katılmamaktadır. İkinci olarak ise Boudouard tepkimesinin hesaplanması için kullanılan kinetik parametrelerin, kullanılan kömür için uygun olmama ihtimali göze alınmalıdır. Böyle bir durum yaşanmaması için, kömür gazlaştırmayı etkileyen kimyasal kinetik parametrelerinin, gazlaştırmada kullanılan kömür üzerinde yapılacak deneyler yardımı ile belirlenmesi gerekir.

Yapılan modelleme çalışmasının sonucunda hidrojen ve metan gazları da açığa çıkmamaktadır. Karşılaşılan bu durum, matematik modelin kurulumunda yapılan varsayımlar ile açıklanabilir. İlk olarak, matematik modelde metanlaşma tepkimeleri kullanılmamıştır ve metan denklemi çözülmemektedir. Deney sonuçlarına bakılınca

yalnızca %3 metan açığa çıkıyor oluşu bu varsayımı bir miktar kabul edilebilir kılmaktadır. Kurgulanan modelde ayrıca kömürün tamamen karbondan oluştuğu varsayılmaktadır. Dolayısı ile dışarıdan sağlanmadığı sürece sistem içerisinde su buharı bulunmamaktadır. Modelde kullanılan kimyasal tepkimeler incelendiğinde hidrojen oluşumu için su buharının mutlaka sistemde bulunması gerektiği görülmektedir.



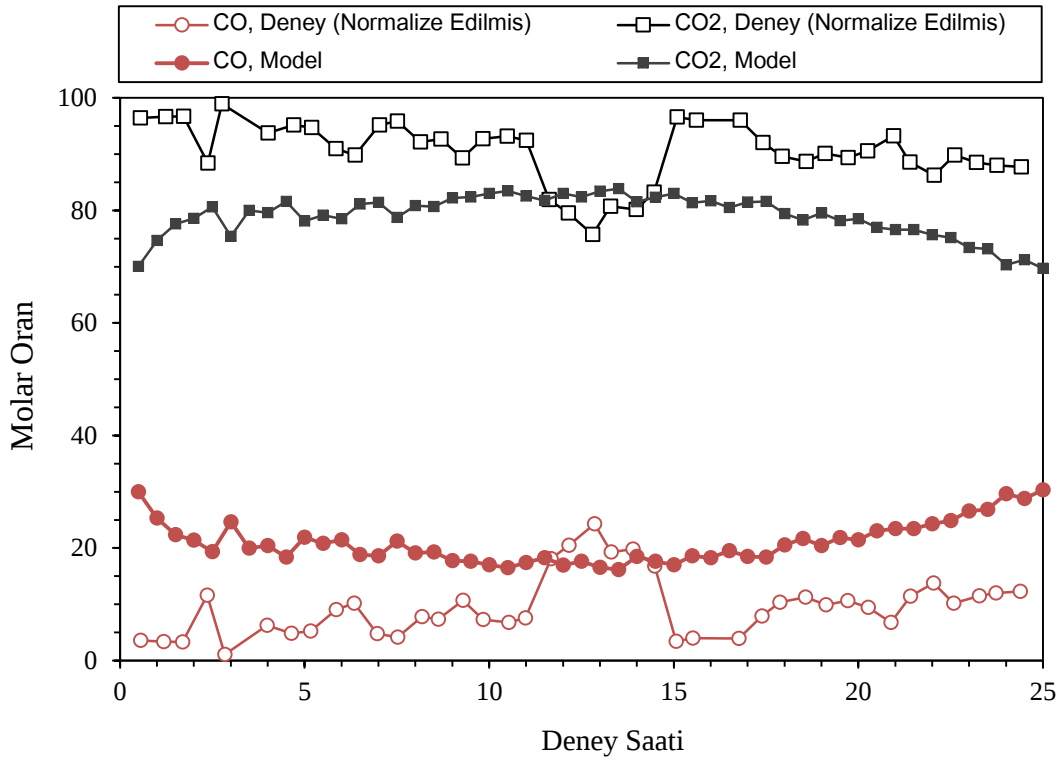
Şekil 5.2: Matematik modelleme sonucu elde edilen yapay gaz bileşimlerinin 3 no'lu deney sonuçları ile karşılaştırılması.

Tüm bu sayılan etmenlerin dışında, tüm bileşenlerin molar oranına doğrudan etki eden piroliz süreci de matematik modelde hesaba katılmamıştır. Piroliz mekanizması, kömür içerisinde bulunan yapıların çeşitli gaz fazında bileşenlere ayrışmasını sağlamaktadır. Bu bileşenler CO, CO₂, H₂ ve CH₄ gibi yapay gazın içeriğini ve kalitesini doğrudan etkileyen bileşenlerdir. Yapılan deneyler incelendiğinde pirolizin gerçekleşmesi azaldığında yapay gazın kalitesinin ciddi miktarlarda azaldığı görülmektedir. Matematik model kullanılarak elde edilen yapay gaz değerlerinin deneyler ile elde edilen yapay gaz bileşimini tahmin edebilir hale gelmesi için piroliz ve kuruma mekanizmalarının modellenmesi gerekmektedir. Bu durum nedeni ile deney verileri ile karşılaştırma yapılırken, deneyden elde edilen CO ve CO₂ bileşenleri kendi aralarında normalize edilerek model sonuçları ile karşılaştırılmada kullanılacaktır.

5.3 Literatür Çalışmaları ile Teorik Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kurgulanan matematik modelin doğruluğunun araştırılması amacı ile literatürde nitelikleri açıkça belirtilmiş deneysel bir çalışmanın analizinin yapılması istenmiştir. Bu çalışma için Stanczyk v.d. (2010) tarafından yapılan deneyler temel alınmıştır. Analizde 4 m³/h sabit saf oksijen beslemesi yapılmış ve deneyde kullanılan deney düzeneği boyutları kullanılarak 25 saatlik bir deney benzetimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Stanczyk v.d. tarafından ilki 2010 yılında, ikincisi ise 2011 yılında gerçekleştirilmiş iki deney sonucu ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan ilk karşılaştırma Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Bu karşılaştırma yapılırken, kurgulanan matematik modelde hidrojen, metan ve diğer iz bileşenlerin oluşum süreçleri bulunmadığı için deneysel verilerden elde edilen karbondioksit ve karbonmonoksit oranları kendi aralarında normalize edilerek sonuca yansıtılmıştır. Deney boyunca oksijen besleme debisi 3-5 m³/h arasında değişmiştir. Ayrıca deneyin yaklaşık olarak 20. saatinde oksijen beslemesi durdurularak yalnızca su buharı beslenmiştir. Bu süreç oldukça kısa sürdüğü için ortalama bir değer olarak deneyin 4 m³/h oksijen beslemesi ile temsili çok yanlış olmayacaktır.



Şekil 5.3: Stanczyk v.d. (2010) tarafından yapılan deney sonuçları ile matematik model sonuçlarının karşılaştırılması [41].

Sonuçlar incelendiğinde, ilk göze çarpan durum matematik modelleme ile elde edilen verilerde hidrojen bulunmamasıdır. Bunun nedeni kömür içerisinde bulunan nemin modelde hesaba katılmamasıdır. Karbonmonoksit ve karbondioksit seviyeleri incelendiğinde ise yapılan modellemede karbondioksit miktarı deneye göre daha düşük seviyelerde tahmin edilirken, karbonmonoksit miktarının ise daha yüksek tahmin edildiği görülmektedir. Bu sonuç üzerinde hidrojenin yoksunluğunun bir katkısı olmakta ise de, asıl sebebin bu olmadığı düşünülmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde CO oranının deneyin başlangıcında %10 seviyesinin de altında olduğu görülmektedir. Bu durum, deney sırasında Boudouard tepkimesinin etkinliğinin beklenilenin altında olduğu anlamını taşıyor olabilir.

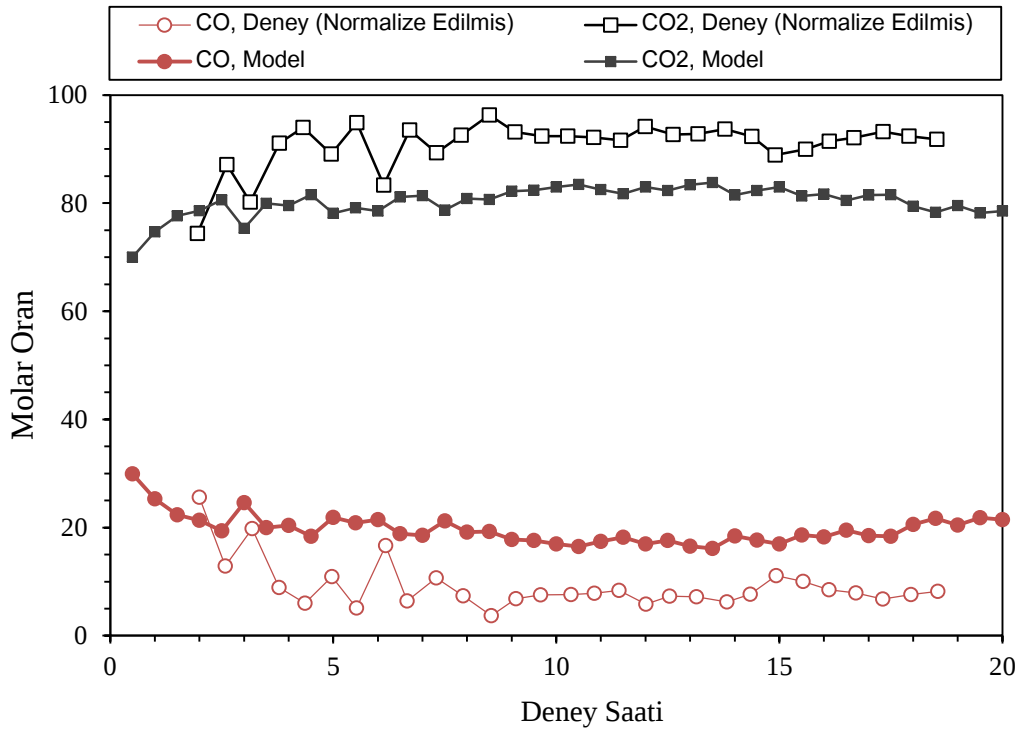
Deneyin genel yönelimi incelendiğinde, deneyin ilerlemesi ile birlikte CO miktarının deneyin başlangıcında öncelikle bir düşüş yaşayışı, daha sonra artışa geçişi ve CO₂ miktarının deneyin başlangıcında artış yaşaması ile deneyin devamında CO₂ miktarında gözlenen azalma eğilimi matematik model tarafından yakalanabilmiştir. Bununla birlikte deneyin 11-14 saatleri arasında elde edilen yapay gazın karakterinin değiştiği görülmektedir. İncelenen çalışmada bu değişimin nedeni ile ilgili herhangi bir açıklama ya da yorum bulunmamaktadır. Süreç içerisinde yaşanan bu rejim değişikliği sırasında deney verileri ile matematik model verilerinin yakınlığının oldukça yükseldiği görülmektedir.

Aynı analiz sonuçlarının karşılaştırıldığı bir diğer çalışma ise yine Stanczyk v.d tarafından gerçekleştirilen ve sonuçları 2011 yılında yayınlanan çalışmalarıdır. Bu çalışmada gerçekleştirilen ilk deneyin ateşlemeden itibaren 18,5 saatlik bölümü saf oksijen kullanılarak ve 4-5 m³/h besleme debisi ile gerçekleştirilmiştir. Deney verileri ile matematik modelleme sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.4'de verilmiştir. Bir önceki karşılaştırmada olduğu gibi, bu karşılaştırma yapılırken de kurgulanan matematik modelde hidrojen, metan ve diğer iz bileşenlerin oluşum süreçleri bulunmadığı için deneysel verilerden elde edilen karbondioksit ve karbonmonoksit oranları kendi aralarında normalize edilerek sonuca yansıtılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, daha önce irdelenen karşılaştırmada da görüldüğü gibi matematik modelin CO seviyelerini yüksek, CO₂ seviyeleri ise daha düşük tahmin edilmiştir. Ancak bileşenlerin zaman içerisinde değişim karakteristikleri incelendiğinde, yapılan modelleme çalışmasının, deney sonuçları ile daha paralel bir yönelim gösterdiği dikkati çekmektedir. Bu durum, kurgulanan modelin karbon tabanlı

kimyasal etkileşimleri, hidrojen ve su buharı tabanlı kimyasal etkileşimlere göre daha doğru bir şekilde ele aldığını göstermektedir.

Üzerinde durulması gereken bir diğer konu ise, Bölüm 6.2’de yapılan inceleme sonucunda modelleme sonuçlarının CO miktarını düşük tahmin ediyor iken, bu bölümde gerçekleştirilen karşılaştırmalarda ise matematik modelin CO miktarını daha yüksek tahmin ediyor olmasıdır. Bu farklılığın asıl nedeninin, yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan kömürlerin Bölüm 6.1’de bahsedildiği üzere çok farklı özelliklere sahip olması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.4: Stanczyk v.d (2011) tarafından yapılan deney sonuçları ile matematik model sonuçlarının karşılaştırılması [42].

6. MATEMATİK MODEL İLE PARAMETRE ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada, yeraltında kömür gazlaştırma işleminin ve deneylerinin sayısal benzetiminin yapılabilmesi amacı ile MATLAB® dilinde yazılmış bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Söz konusu programın kurgusu Bölüm 2’de ayrıntıları ile verilmiştir.

Matematik model sonuçlarının doğruluğunun karşılaştırılabilir olması amacı ile analiz için kullanılacak kömür boyutu, deneylerde kullanılan reaktör iç hacmini temsil edecek şekilde belirlenmiştir. Buna göre toplam uzunluk 0,5 m, kömür bloğunun yarıçapı ise 0,25 m olarak alınmıştır.

Programın içerisinde kömürün geometrik özellikleri dışında yeraltı kömür gazlaştırma işleminde kullanılan debi, gaz bileşimi gibi parametreler ile hesaplamalarda kullanılan birkaç model sabiti (örneğin; gaz nüfuz derinliği δ_{GND}) gibi parametreler bulunmaktadır. Ayrıca sürecin başlangıcında bulunan kömür sıcaklığının artırılması süreci de modelde ilk şartlar ile kontrol edilmektedir. Bu parametrelerin belirlenmiş olan referans değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Matematiksel modelde kullanılan referans analiz parametreleri

Gazlaştırıcı	Debi	Kanal Çapı	Tutuşturma Bölgesi	Tutuşturma Sıcaklığı	Gaz Nüfuz Derinliği	Isı Taşınım Faktörü
Oksijen	2,5 m ³ /h	2 cm	15cm × 5cm	1000°C	1 mm	1

Söz konusu bu tabloda verilen parametreler, 1 no’lu deneyin sayısal benzetimi için kullanılan parametrelerdir. Bunun yanında her bir parametrenin sayısal çözümü nasıl etkiledikleri de görülmek istenmektedir. Bu nedenle yukarıda belirlenmiş olan referans parametrelerden her seferinde yalnızca bir tanesi değiştirilerek birçok analiz yapılmış ve çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Denenen parametrelerin listesi Çizelge 6.2’de verilmiştir. Böylece hem kullanılan programın davranışı incelenmekte, hem de yeraltında kömür gazlaştırma işlemi üzerinde farklı işletme parametrelerinin etkisini görmek mümkün olmaktadır. Analizlerde kullanılan uzaysal ve zamansal ayırıklaştırma parametreleri ise Çizelge 6.3’te verilmiştir.

Çizelge 6.2: Matematik model kullanılarak yapılacak karşılaştırma parametreleri.

Değiştirilen Parametre	1. Değişiklik	2. Değişiklik
Gazlaştırıcı	Oksijen	%90 Oksijen + %10 Buhar
Debi	1,0 m ³ /h	1,5 m ³ /h
Kanal Çapı	1 cm	4 cm
Tutuştirma Bölgesi	5×5 cm	5×15 cm
Tutuştirma Sıcaklığı	750°C	850°C
Gaz Nüfuz Derinliği	0,75 mm	1,5 mm
Isı Taşınım Faktörü	0,5	2

Yapılan çalışmalarda gazlaştırma sürecinin ilk beş saatlik bölümü incelenmiştir. Kömür bloğunun ısıtılması için geçirilen 2 saatlik süreyi temsilen gazlaştırma kanalı girişine yakın bir kömür bölgesine yüksek sıcaklık tanımlanmıştır. Böylece analizin başında yanma ve gazlaştırma tepkimelerinin başlayabilmesi sağlanmıştır.

Çizelge 6.3: Sayısal çözümde kullanılan ayırıklaştırma parametreleri.

Δt	Δz	Δr
0,5 s	2 cm	0,1 cm

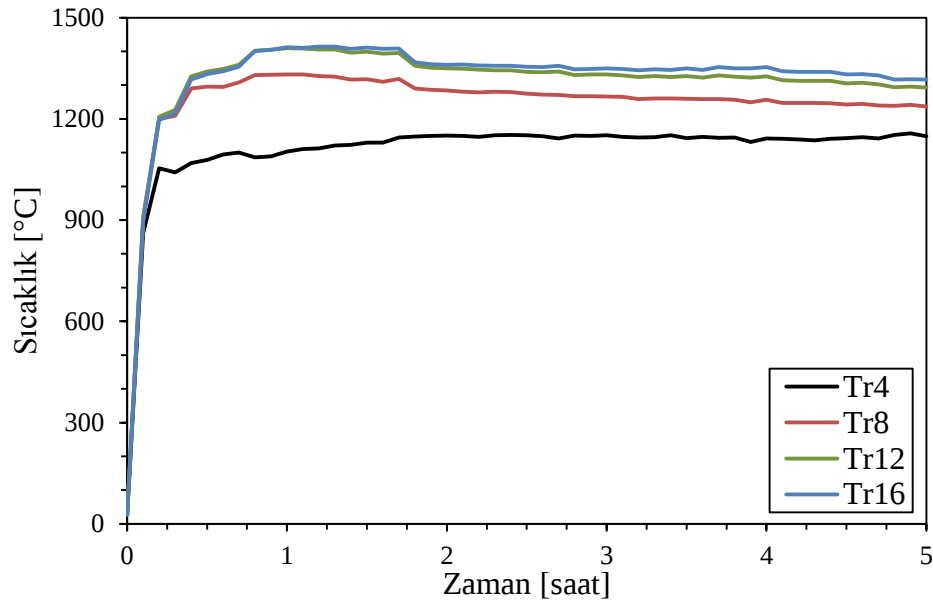
6.1 Oksijen ile Gazlaştırma Analizleri

Kömür bloğu ve gazlaştırma kanalı içerisinde sıcaklık dağılımı, gazlaştırma sürecinin en önemli unsurudur. Bu nedenle sıcaklığın hem zamanla değişimi, hem de gazlaştırma kanalı boyunca değişimi önemli birer veridir. Kanal ve kömür içerisinde toplam sekiz noktadan sıcaklık verilerini zaman içerisinde değişimi Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de verilmiştir. Belirlenen sekiz nokta, deneylerde sıcaklık ölçümü için kullanılan ısı çiftleri ile aynı konumdadırlar. Böylece deney ve matematik model sonuçlarının karşılaştırılması daha rahat yapılabilecektir. Sıcaklık kontrolünde kullanılan noktaların isimleri, deneylerde aynı konumda kullanılan ısı çiftinin ismi ile aynı olacak şekilde belirlenmiştir. Buna göre Tr4, Tr8, Tr12 ve Tr16 noktaları gazlaştırma kanalı içerisinde bulunmakta ve gaz sıcaklığını vermekte iken Tr3, Tr7, Tr11 ve Tr15 ise analizin başlangıcında kömür içerisinde bulunmakta, daha sonra ise kömürün tüketimine bağlı olarak gazlaştırma kanalına çıkmaktadırlar.

Kanal içerisinde gaz sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi incelendiğinde, sıcaklıkların 1000-1400°C aralığında kaldığı görülmektedir. Gaz sıcaklığı kanal boyunca artmaktadır. Bunun sebebi olarak yanma tepkimelerinin kanal boyunca devam etmesi gösterilebilir. Şekil 6.7’den de görülebileceği gibi oksijen, gazlaştırma kanalı çıkışına kadar tamamen tüketilememektedir. Sıcaklıkların zaman içerisinde

gösterdikleri eğilim incelendiğinde ise yaklaşık bir saat boyunca tüm sıcaklıkların arttığı, daha sonrasında ise yavaş bir azalma eğilimine girdikleri görülmektedir.

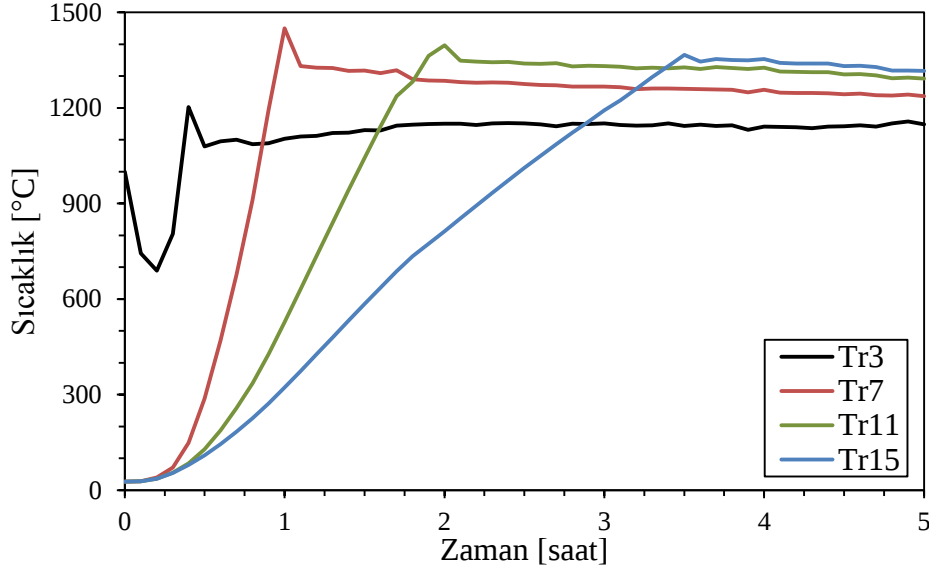
Kömür içerisinde, gazlaştırma kanalının 5 cm üzerinde bulunan noktaların sıcaklıkları incelendiğinde ise kömürde meydana gelen oyuk büyümesinin etkisi açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Gazlaştırma kanalına en yakın noktadan başlamak üzere sıcaklık ölçüm noktaları tek tek gazlaştırma kanalına açılmaktadırlar. Altı üstlü duran iki ölçüm noktasının sıcaklık gelişimleri incelendiğinde, kömür içerisinde bulunan noktanın sıcaklığı öncelikle neredeyse doğrusal bir artış göstermekte, daha sonra bir tepe noktasından geçerek kanal üzerinde aynı mesafede bulunan ölçüm noktasının sıcaklığı ile bire bir aynı değeri okumaktadır. Sıcaklık artışının doğrusala yakın olduğu ilk evrede ölçüm noktası hâlâ kömür bloğunun içerisindeydir. Sıcaklığın tepe yaptığı zamanda ise kömürün tepkimeye giren yüzeyi, bahsi geçen sıcaklık ölçüm noktasına oldukça yaklaşır, en sonunda ise tepkimeler tam da ölçüm noktasının bulunduğu noktada oluşur. Bu evreden sonra oyuk gelişimi nedeni ile artık ölçüm noktası gazlaştırma kanalının içerisindeydir ve dolayısı ile gaz sıcaklığını ölçmektedir. Yanma önünün hangi zamanda hangi noktaya eriştiği oldukça belirgin bir şekilde grafikte görülmektedir.



Şekil 6.1: Kanal içerisinde sıcaklıkların zamana bağlı değişimi ($Q=2.5\text{m}^3/\text{h}$).

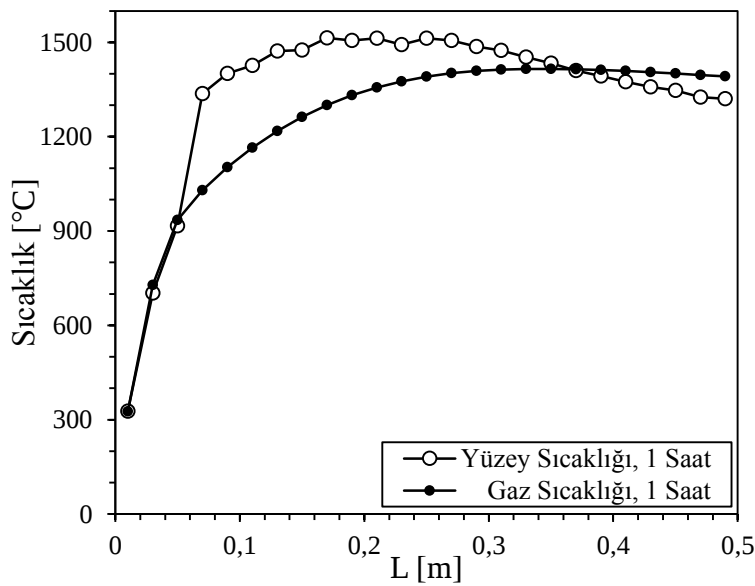
Kurgulanan modelde Bölüm 2’de daha önce de bahsedildiği üzere kömürün yüzey sıcaklığı hesaplanmaktadır. Kömür yüzeyi sıcaklığı, yüzey tepkimeleri için en önemli parametredir. Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’te sırası ile 1 saat, 3 saat ve 5 saat

sonunda gazlaştırma kanalı boyunca kömür yüzey sıcaklığı ile gaz sıcaklığı birlikte verilmişlerdir. Bu grafikler sayesinde heterojen tepkimeler ve ısı transferi ile ilgili farklı bir bakış açısı geliştirmek mümkün olmaktadır.

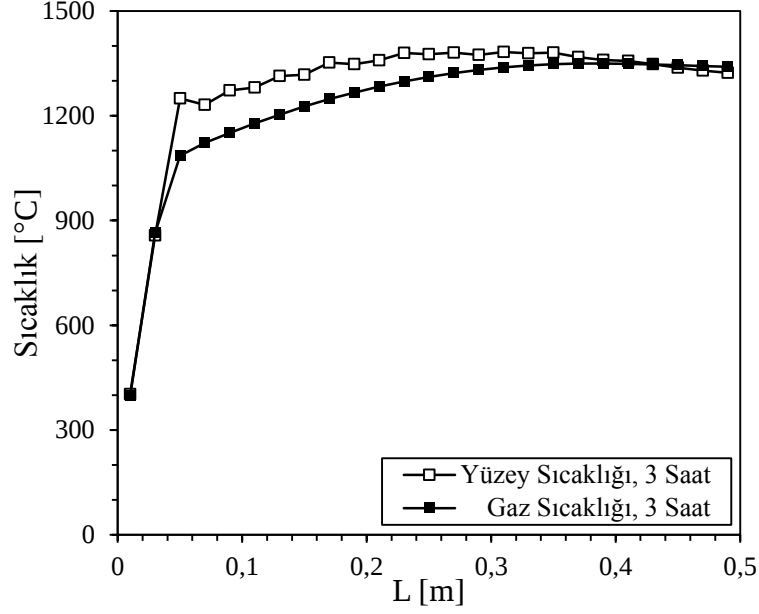


Şekil 6.2: Kanalın 5 cm üzerinde sıcaklıkların zaman bağlı değişimi ($Q=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$).

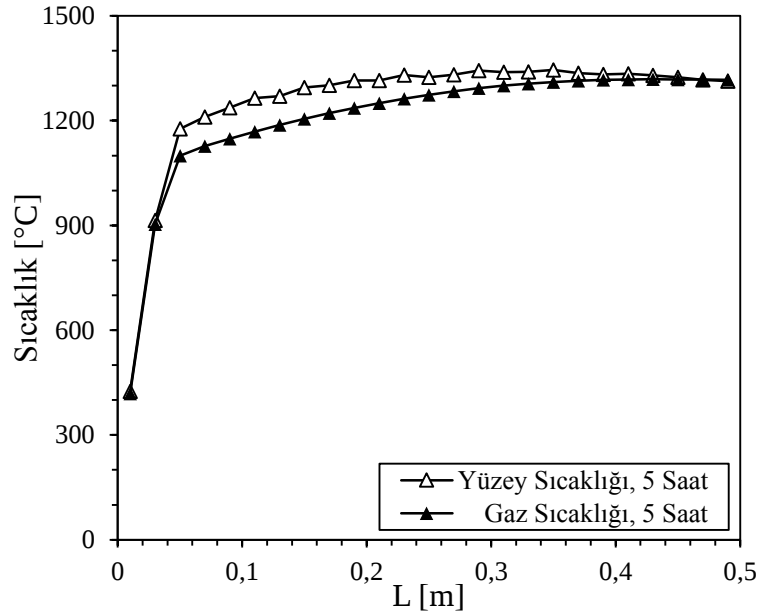
Grafikler incelendiğinde ilk dikkati çeken, gazlaştırma kanalının ilk 5 cm'lik bölümüdür. Burada yüzey ve gaz arasında sıcaklık farkı neredeyse bulunmamaktadır. Ayrıca sıcaklıkların da kısmen düşük olduğu göz önüne alınarak tepkimelerin bu bölgede gerçekleşmediği, yalnızca iletim ile kömürün ısındığı ve bu ısıyı da taşınım yardımı ile gaz fazına geçirerek gazın ısınmasını sağladığı düşünülebilir.



Şekil 6.3: 1 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları ($Q=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$).

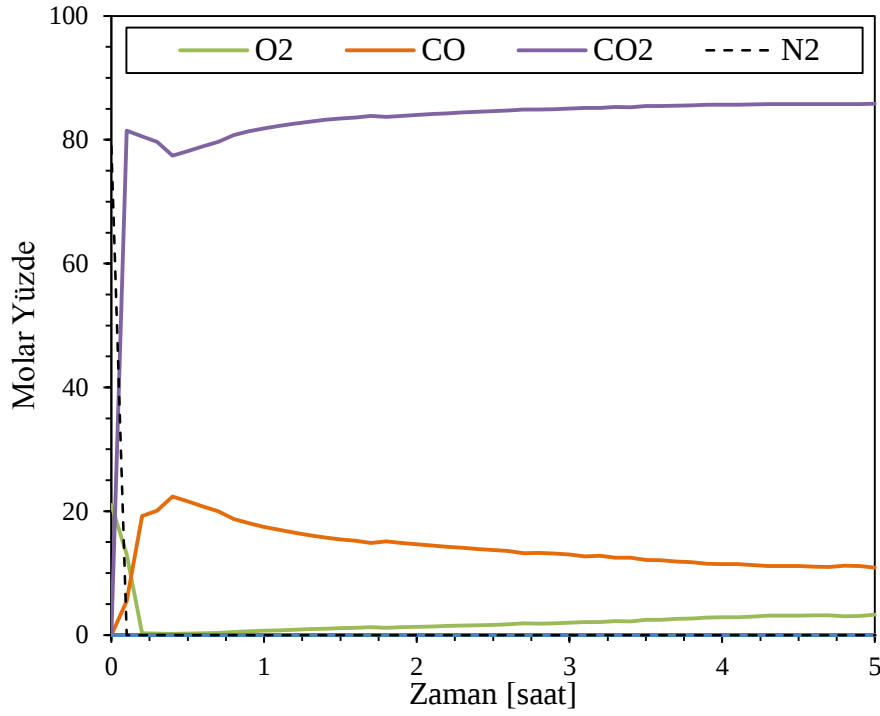


Şekil 6.4: 3 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları ($Q=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$). Giriş bölgesinin hemen ilerisinde ise yüzey sıcaklıkları, gaz sıcaklığının ortalama 100-200°C üstünde seyretmektedir. Bu bölgede ekzotermik yanma tepkimelerinin gerçekleştiği söylenebilir. Tepkimeler sonucu yüksek sıcaklıklara çıkan kömür yüzeyi, gaz fazının da sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 6.5: 5 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları ($Q=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$). Gazlaştırma kanalının sonlarına doğru sıcaklıkların azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu durumun iki sebebi vardır. İlk olarak gaz içerisinde yanma tepkimelerine girecek oksijen miktarı, bu bölgelerde oldukça azalmıştır. İkinci olarak ise yine oksijenin azlığına ve yüksek sıcaklıklara bağlı olarak gazlaştırmanın en önemli

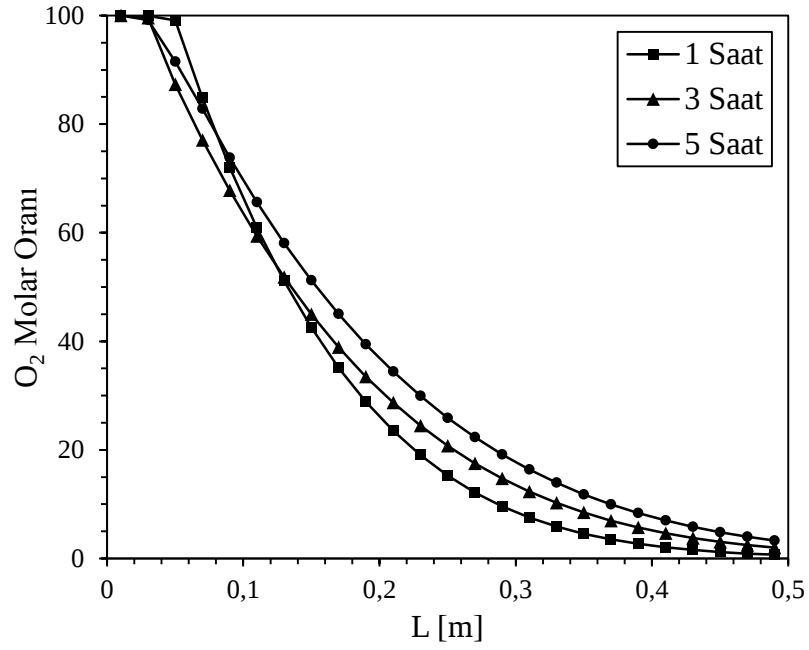
aktörü olan Boudouard tepkimesi, bu bölgede daha yoğun olarak gerçekleşmektedir. Endotermik olan bu tepkime sonucunda kömür yüzey sıcaklığında düşüş yaşanmaktadır. Bunun yanı sıra kanalın ön tarafından sıcak olarak gelen gaz ise bir yandan soğuyan kömür yüzeyini ısıtmaktadır. Bu üç etmenin etkisi altında, gazlaştırma kanalının son bölümlerinde hem kömür yüzey sıcaklığının hem de gaz sıcaklığının düşme eğiliminde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.6: Elde edilen yapay gaz bileşiminin zamana bağlı değişimi ($Q=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$).

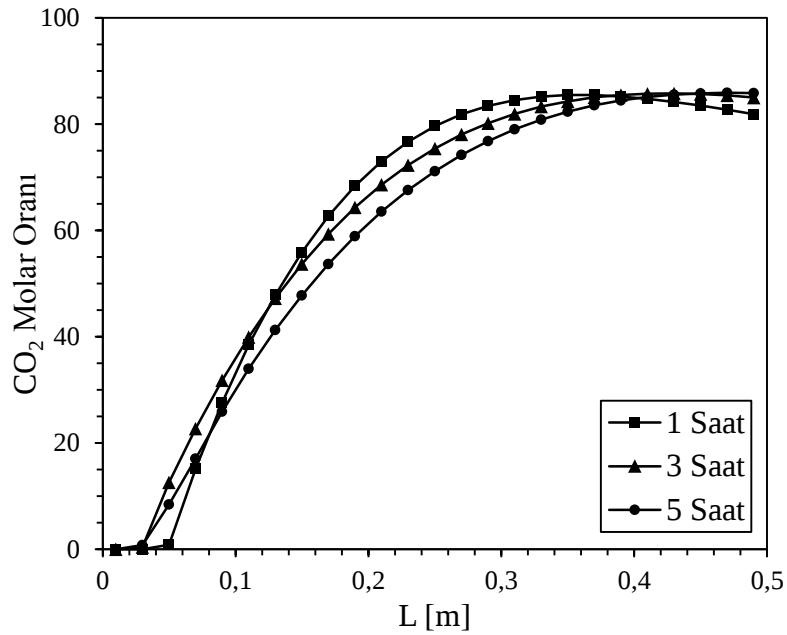
Elde edilen yapay gaz bileşiminin zamanla değişimi Şekil 6.6'da verilmiştir. Bileşenlerin gazlaştırma kanalı boyunca konuma bağlı değişimleri ise Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Zamanla yaşanan gelişim incelendiğinde gazlaştırma işleminin ilk 15 dakikasında oksijenin tamamen tüketilmediği görülmektedir. Söz konusu sürenin, kömür bloğunun içerisindeki sıcaklık dağılımının ilk verilen tutuşturma değerinin ardından bloğun içine yayılması ve fiziksel olarak daha gerçekçi bir dağılıma doğru gelişmesi için geçen süre olduğu söylenebilir.

Oksijenin tepkimeler sonucunda tamamen tüketildiği, önceki süreci takip eden on beş dakikalık süre boyunca gazlaştırmanın en başarılı şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Başarılı geçen ikinci evrenin sonunda, gazlaştırma kanalı boyunca oksijenin tamamen tüketilememesine bağlı olarak, üçüncü evre başlamaktadır. Üçüncü evre, en kararlı devam eden ve en uzun süren evredir. Burada oksijenin zamanla daha da az tüketildiği, buna bağlı olarak da yanıcı karbonmonoksit üretiminin yavaşladığı görülmektedir.

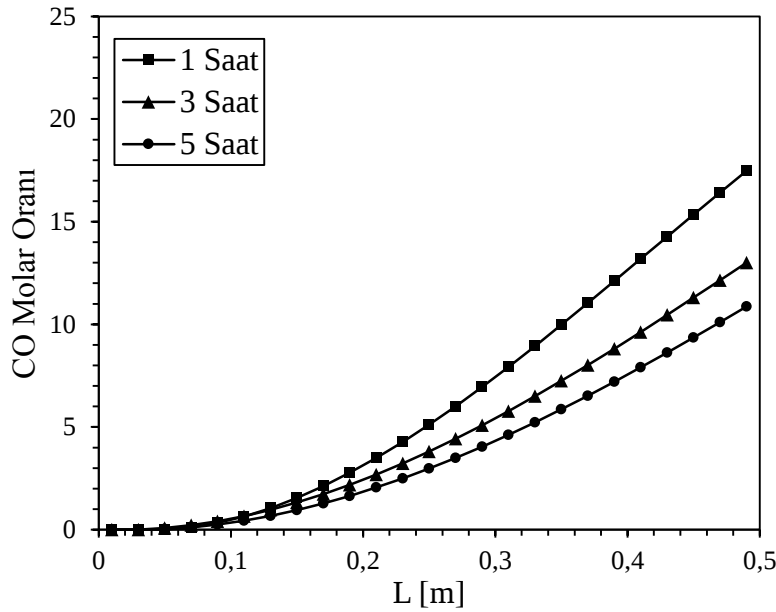


Şekil 6.7: Oksijen oranının kanal boyunca değişimi ($Q=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$).

Oksijenin tam olarak tüketilemiyor oluşu birkaç nedene bağlı olabilir. Bunlardan ilki kömür bloğu içerisinde sıcaklığın yeterli olmayışdır. Fakat yapılan incelemelerden görülmektedir ki sıcaklıklar tepkimelerin gerçekleşmesi için yeterince yüksektir. Bir diğer neden ise, oyuk gelişimi nedeni ile oksijenin kömür yüzeyine erişiminin güçleşmesi olarak gösterilebilir. Tepkimeler sonucunda gittikçe büyüyen gazlaştırma kanalı, zamanla daha da çok oksijenin tüketilmeden sistemden uzaklaşmasına sebep olmaktadır.

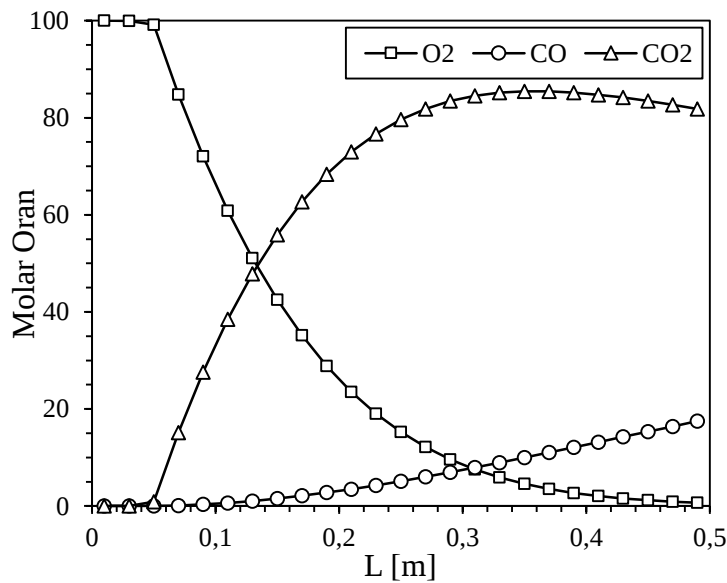


Şekil 6.8: Karbondioksit oranının kanal boyunca değişimi ($Q=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$).

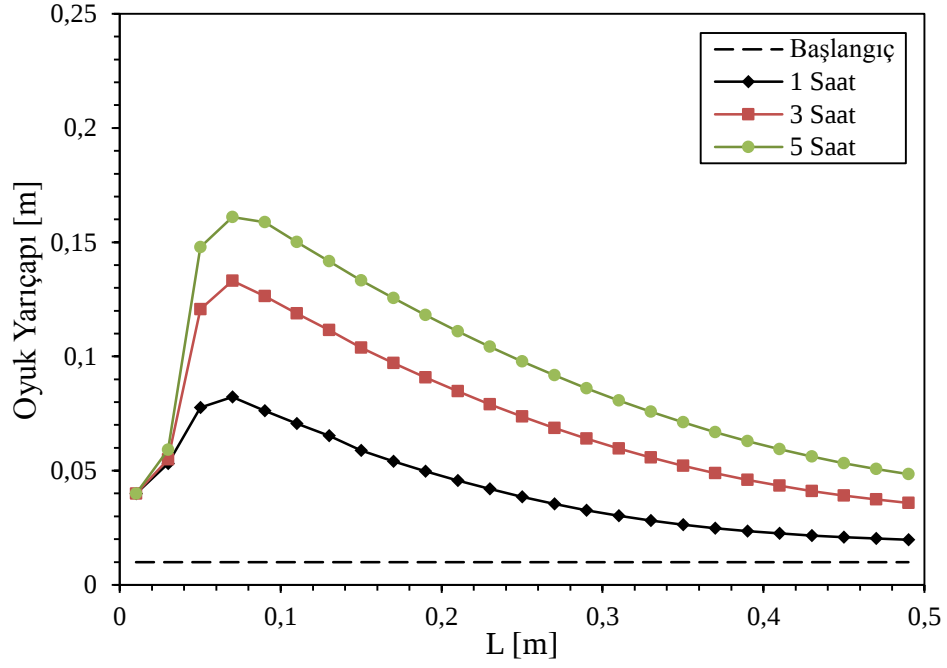


Şekil 6.9: Karbonmonoksit oranının kanal boyunca değişimi ($Q=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$).

Bileşenlerin değişimi incelendiğinde, karbonmonoksit oluşumunun oksijenin azalması ile birlikte hızlandığı görülmektedir. Aynı şekilde karbondioksit yıkımının da gazlaştırma kanalının son kısımlarında gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca gazlaştırma kanalının son kısımlarında gaz ve kömür yüzey sıcaklıklarının azalmasından da yanma tepkimelerinin kanalının ön kısımlarında gerçekleşirken, gazlaştırma tepkimelerinin kanalın arka kısımlarında daha etkin olduğu anlaşılabılır. Bu durum da göstermektedir ki gazlaştırmanın gerçekleşebilmesi için oksijenin ilk önce tüketilmesi gereklidir. Şekil 6.10'da gazlaştırmanın birinci saatinin sonunda bileşenlerin kanal boyunca nasıl değiştiği görülebilmektedir.



Şekil 6.10: Bileşenlerin 1 saat sonunda kanal boyunca değişimi ($Q=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$).



Şekil 6.11: Kömür bloğu içerisindeki oyukun zamanla gelişimi ($Q=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$).

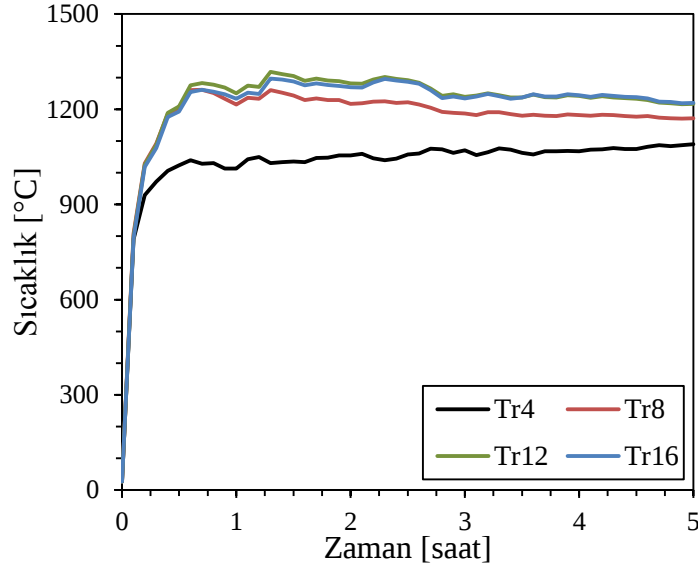
Şekil 6.11’de ise gazlaştırma sırasında kömür bloğu içerisinde oluşan oyukun zaman ile gelişimi görülmektedir. Oluşan şekil incelendiğinde, literatürde oyuk ile ilgili yapılmış çalışmalarda elde edilen yapısı ile sayısal benzetimler sonucu ortaya çıkan oyuk şeklinin birbirlerine benzer olduğu görülmektedir.

6.2 Oksijen ve Su Buharı Karışımı ile Yapılan Analizler

Yeraltında kömür gazlaştırma ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, elde edilen yapay gazın ısı değerini arttırmak amacı ile içerisinde bulunan yanıcı gaz miktarlarını arttırmaya yönelik yapılan çalışmalar görülmektedir. Bu çalışmaların en üzerinde durulanı, kömür yatağına su buharı beslenerek hidrojen elde edilmesine yöneliktir. Bu çalışma kapsamında hazırlanan matematik model, su buharı ile gazlaştırma tepkimesini de içermektedir. Kurgulanan matematik modeli doğrulama amacıyla %100 oksijen beslemesinin yanında 1:9 buhar/oksijen oranı ile sayısal analiz yapılmıştır.

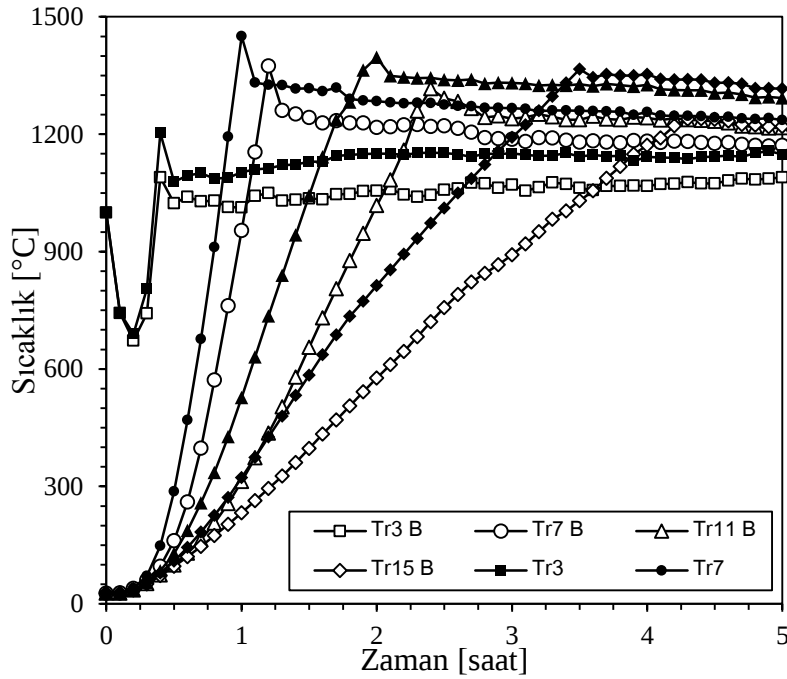
Buharlı olarak yapılan analizde gazlaştırma kanalı içerisinde sıcaklıkların zamana bağlı değişimi Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, sıcaklıkların zamana bağlı karakterlerinin, saf oksijen kullanılarak yapılan analizlerde gözlemlenen karakterlerle benzer olduğu görülmektedir. Kanal içerisindeki sıcaklıkların genel

olarak 900-1300°C aralığında olduğu görülmektedir ki bu saf oksijen kullanılarak yapılan analizden yaklaşık olarak 100°C düşüktür.



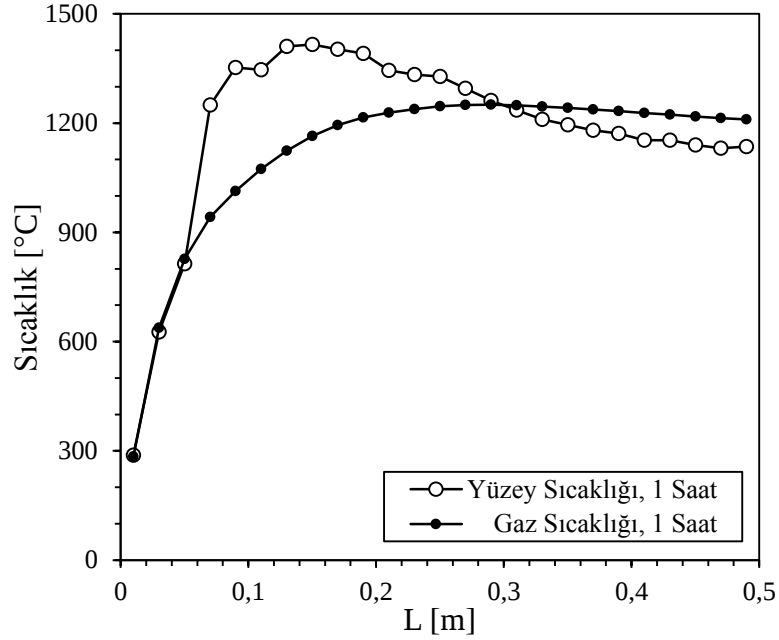
Şekil 6.12: Kanal içerisinde sıcaklıkların zamana bağlı değişimi (Buharlı).

Şekil 6.13'te ise saf oksijen beslemesi yapılarak ve %10 su buharı eklenerek yapılan analizlerde kömür bloğu içerisindeki sıcaklık değişimlerinin karşılaştırması bulunmaktadır. Grafik incelenecek olursa buhar beslemesinin yapıldığı durumda sıcaklıkların daha düşük olduğu ve oyuk gelişiminin daha yavaş gerçekleştiği, buna bağlı olarak ölçüm noktalarının gaz kanalına daha geç açıldıkları görülmektedir.



Şekil 6.13: Saf oksijen beslemeli ve oksijenin yanında %10 su buharı beslemeli durumlarda kömür içi sıcaklıklarının karşılaştırılması.

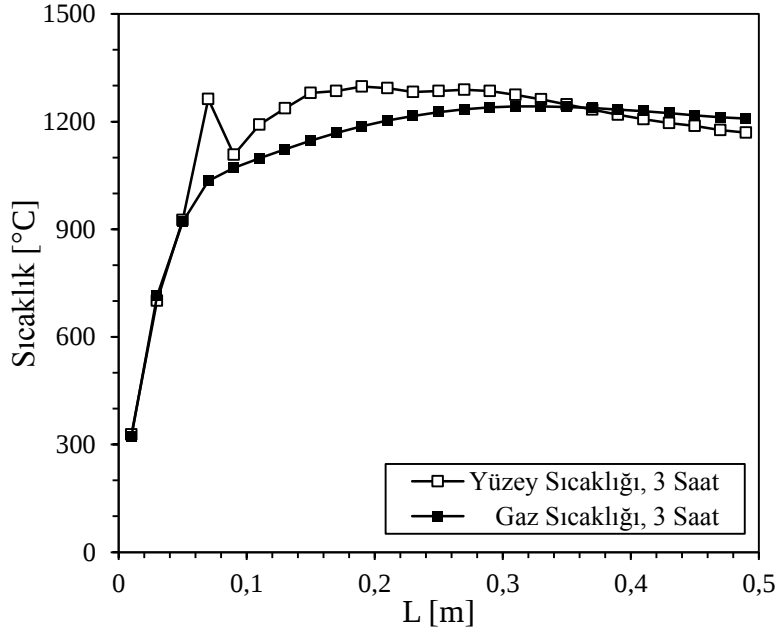
Kömür yüzeyi ile gaz fazı sıcaklıklarının 1 saat, 3 saat ve 5 saat sonunda kanal boyunca değişimlerini veren grafikler sırası ile Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, tamamen oksijenli yapılan çalışmada gözlemlenen karakteristiklerin, burada da korunduğu görülmektedir.



Şekil 6.14: 1 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları (Buharlı).

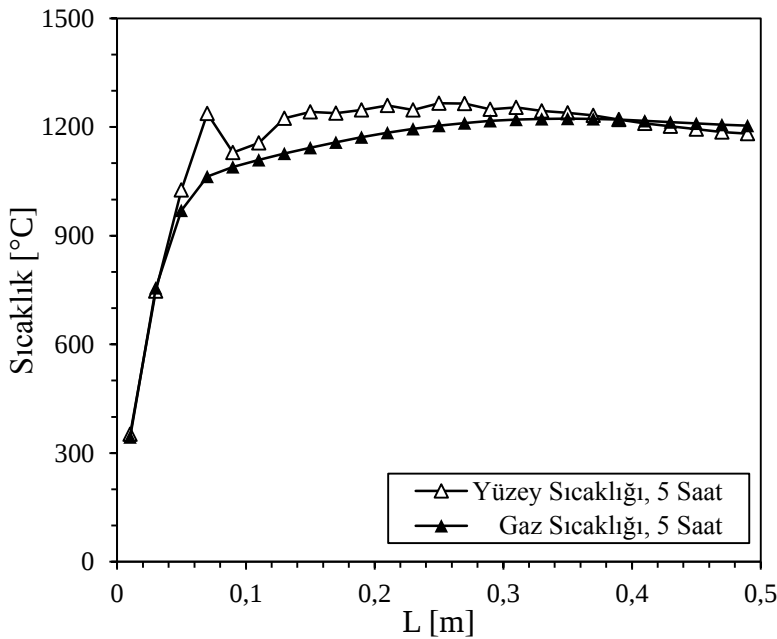
Analiz başlangıcından 1 saat sonra oluşan sıcaklık dağılımları incelendiğinde, kömür yüzey sıcaklığının azalmaya başladığı noktanın kanal girişine uzaklığının yaklaşık 15 cm olduğu söylenebilir. Bu uzaklığın, yalnızca saf oksijen kullanılarak yapılan analizde 25 cm olduğu görülmektedir. Benzer bir şekilde 3 saat ve 5 saat sonunda sıcaklık dağılımları incelendiğinde de, söz konusu soğuma başlangıç noktasının kanalın başlangıcına doğru yaklaşık 5 cm gerilediği görülmektedir.

Sıcaklıklar incelendiğinde ise daha önceden belirtildiği gibi gaz sıcaklığında yaklaşık olarak 100°C'li bir düşüş görülmektedir. Kömür yüzeyi sıcaklıkları ise saf oksijen kullanılan duruma göre bir miktar daha değişkendir. Yanmanın olduğu gazlaştırma kanalının ilk yarısında, 1 saat sonunda kömür yüzey sıcaklığı buhar kullanılan durumda, saf oksijen kullanılan duruma göre 80°C daha soğuk ilerlerken, gazlaştırma kanalının son bölümlerinde kömür yüzeyi sıcaklıkları, saf oksijen kullanılan duruma göre 200°C düşüktür. Aynı şekilde eğer 3 saat ve 5 saat sonunda elde edilen sıcaklık dağılımları incelenecek olursa, gazlaştırma kanalı sonunda kömür yüzey sıcaklıklarının buharlı ve buharsız analizler arasındaki farkın, gazlaştırma kanalının ilk kısımlarında olan farktan daha büyük olduğu görülecektir.



Şekil 6.15: 3 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları (Buharlı).

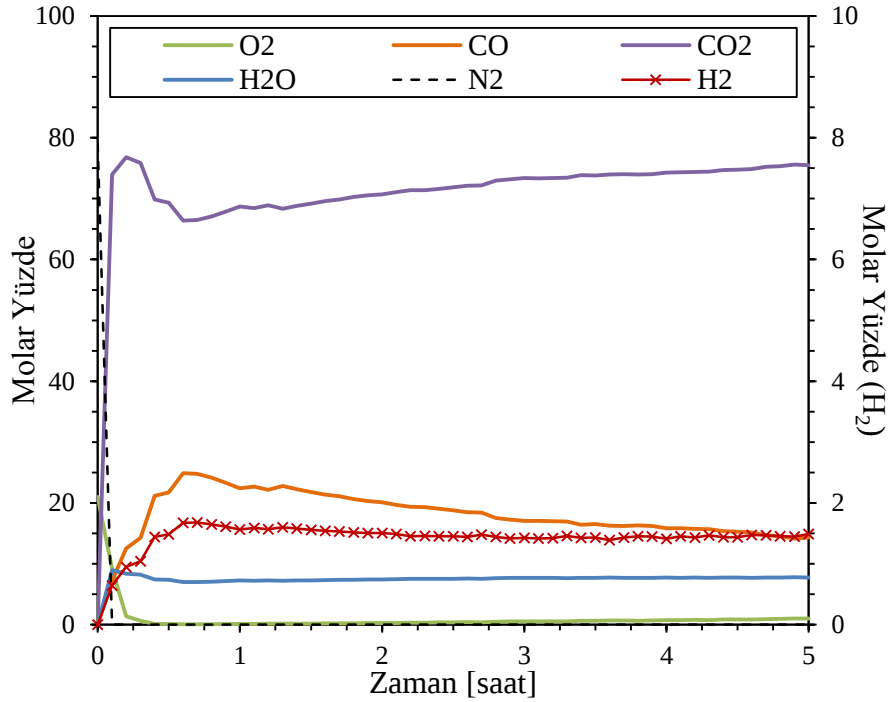
Sıcaklıkların düşüşü iki etki ile rahatlıkla açıklanabilir. İlk etkenin, buhar ile yapılan analizde oksijenin kısmen daha seyrek gelmesi olduğu söylenebilir. Buna bağlı olarak hem daha az yanma tepkimesi gerçekleşmekte, hem de derişim bir miktar daha az olduğu için tepkimeler bir miktar daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu etki, kanal boyunca hem yüzey sıcaklıklarının hem de gaz sıcaklıklarının yaklaşık olarak 100°C düşmesini açıklayabilmekte, fakat kanalın arka taraflarında gözlemlenen sıcaklık düşüşüne bir cevap verememektedir.



Şekil 6.16: 5 saat sonra kanal boyunca gaz ve kömür yüzeyi sıcaklıkları (Buharlı).

Bir diğerk ve daha etkili bir neden ise su buharına bağılı olarak oluşank gazlaştırmak tepkimesidir. Su buharının kömürdeki karbon ile etkileşime girerek ortaya karbonmonoksit ve hidrojen açığı çıkartan bu tepkime endotermik, yani ısı çeken bir tepkimedir. Sistemde buharın ve nemin varlığında, yanma tepkimeleri ile açığı çıkan ısınnın bir kısmı buhar gazlaştırmak için kullanılarak sıcaklıkların düşmesine yol açar.

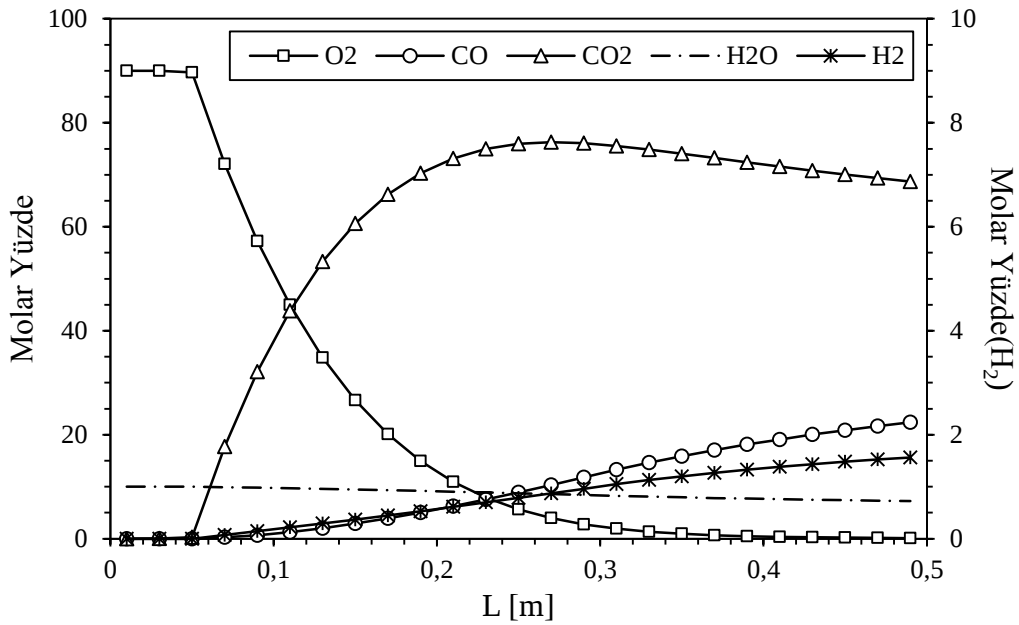
Yapay gaz bileşiminin kanal çıkışında zamana bağılı değışimi Şekil 6.17’de verilmiştir. Gaz içerisindeki yanıcı bileşenlerin miktarı incelendiğinde karbonmonoksit miktarının 45 dakika içerisinde %25 seviyesine çıktığı, daha sonra kararlı bir şekilde azalarak 5 saat sonunda %15 seviyelerine kadar gerilediğı görölmektedir. Hidrojen ise ilk 45 dakika içerisinde %1,5 seviyesine çıkmış, ardından sürecin sonuna kadar bu seviyede sabit kalmıştır.



Şekil 6.17: Elde edilen yapay gaz bileşiminin zamana bağılı değışimi (Buharlı).

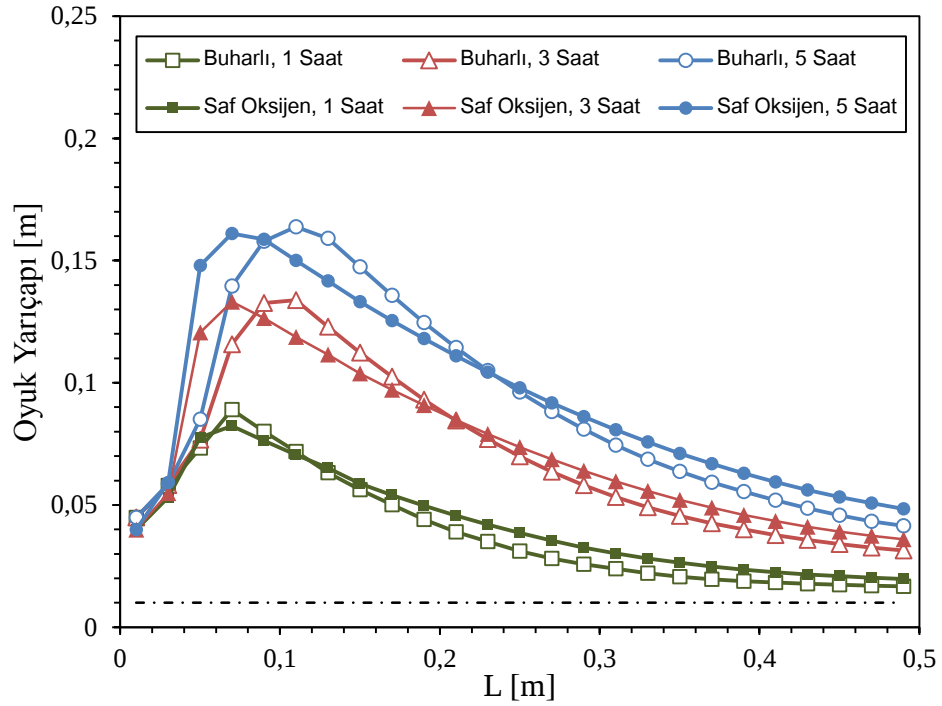
Yanıcı olmayan gazlar incelendiğinde, karbondioksit miktarının 45. dakikadan itibaren karbonmonoksit ile ters orantılı olarak değıştiğı görölmektedir. Bu da bize zaman ilerledikçe Boudouard tepkimesinin daha az gerçekleştiğini göstermektedir. Bir yandan da oksijen miktarının zamanla az da olsa arttığını ve tamamen tükenmediğini görmek mümkündür. Bu durumda açığı çıkan karbonmonoksitin, tam olarak tüketilemeyen oksijenle tepkimeye girerek yandığı ihtimali de düşünölmelidir. Karbonmonoksitin zamanla azalır iken karbondioksit miktarının artıyor oluşuna etki eden nedenlerden biri de bu durum olabilir.

Gazlaştırma kanalı boyunca gaz içerisindeki bileşenlerin konum ile değişimi ise Şekil 6.18’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde karbonmonoksit ve hidrojen oluşumunun yanma tepkimelerinin başlaması ile birlikte başladığı görülmektedir. Hem hidrojen üretimi, hem de karbonmonoksit üretimi bir noktadan sonra yavaşlamakta ise de, karbonmonoksitin bu durumdan daha az etkilendiği görülmektedir. Karbondioksit bakıldığında ise, gazlaştırma kanalının ortasından itibaren karbondioksit derişiminin azalmaya başladığı görülmektedir. Bu durumda oksijenin ve dolayısıyla yanma tepkimesinin azalmasının bir payı olduğu gibi, Boudouard tepkimesi sonucunda karbondioksitin karbonmonoksite indirgenmesi de önemlidir. Su buharı incelendiğinde ise girişte verilen miktarın ancak %20’sinin hidrojene dönüştüğü görülmektedir. Literatürde yapılan deneysel çalışmalar ile karşılaştırıldığında bu oranın düşük olduğu düşünülmektedir. Bunun sebebinin su ile gazlaştırma tepkimesi için kullanılan Arrhenius parametrelerinin çalışmada ele alınan probleme uygun olmayışı olabilir.



Şekil 6.18: Bileşenlerin 1 saat sonunda kanal boyunca değişimi (Buharlı).

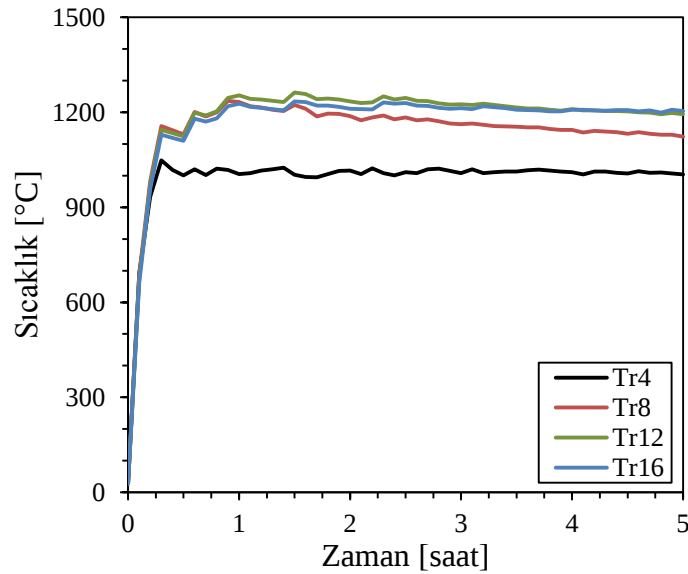
Şekil 6.19’da ise oyuk gelişiminin saf oksijen kullanıldığı durum ile buhar beslemesinin olduğu durum arasındaki farkını göstermektedir. Her iki durumda da oyukun en geniş noktasının aynı yarıçapa sahip oldukları görülmektedir. Ancak oyukun en geniş olduğu bölümün buharlı analizlerde kanalın orta bölümlerine doğru ilerlediği görülmektedir. Aynı zamanda kanalın çıkışına doğru oyukun saf oksijen ile yapılan analizlerde daha geniş olduğu görülmektedir.



Şekil 6.19: Saf oksijenli durumda ve buhar beslemeli durumda kömür bloğu içerisindeki oyukun zamanla gelişimi.

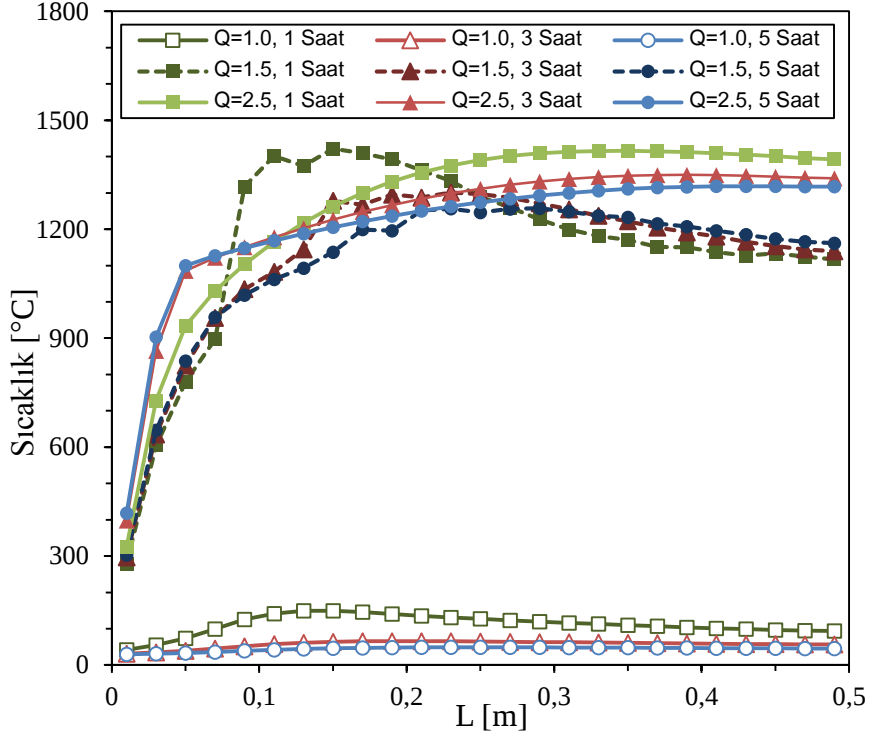
6.3 Gazlaştırma Debisi Etkisi

Yapılan deneysel çalışmalarda 1 ile 3 m³/h arasında değişen besleme debileri kullanılmıştır. En çok kullanılan iki debi değeri ise 2,5 ve 1,5 m³/h'tir. Bunun yanında sayısal analizlerde karşılaştırma amaçlı olarak 1 m³/h besleme debisi de kullanılmıştır. Besleme debisi olarak 1 m³/h kullanılan analizde yanma devam etmemiş, sıcaklıkların düşüşüne bağlı olarak tepkimeler durmuştur.



Şekil 6.20: Kanal içerisinde sıcaklıkların zamana bağlı değişimi (Q=1,5 m³/h).

Şekil 6.20’de 1,5 m³/h debi ile saf oksijen beslenmesi durumunda gaz kanalı içerisinde sıcaklıkların zaman bağlı değişimi gösterilmektedir. Daha önce incelenen analizlere paralel sonuçlar alındığı görülmektedir. Sıcaklıklar 1000-1300°C bandında kalmaktadır. 2,5 m³/h debi ile yapılan analize ile karşılaştırıldığında bu sıcaklığın bir miktar düşük olduğu görülmektedir.

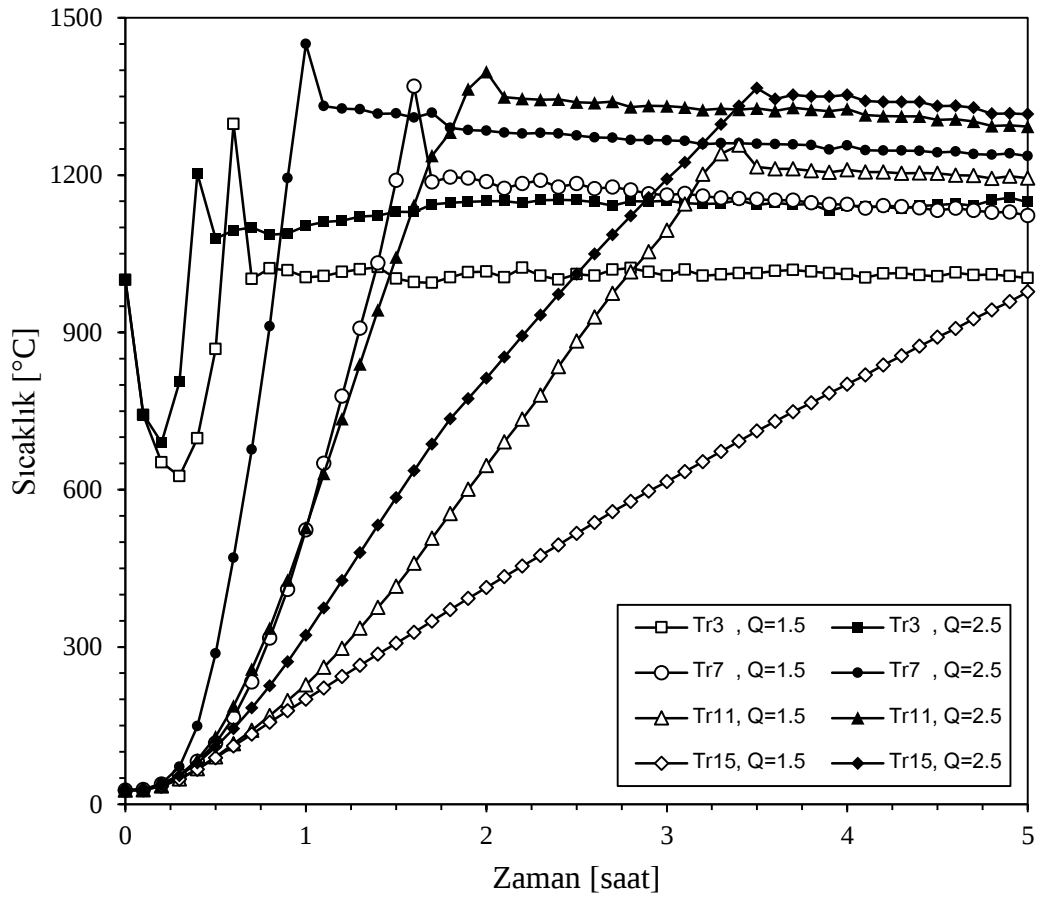


Şekil 6.21: Gazlaştırma debisinin gaz sıcaklığı dağılımına etkisi.

Şekil 6.21’de ise farklı debi değerleri ile yapılan analizler sonucu elde edilen gaz sıcaklıklarının gazlaştırma kanalı boyunca değişimi gösterilmiş ve karşılaştırılmıştır. Daha önceden belirtildiği gibi 1 m³/h debi kullanılarak yapılan analizlerde yanmanın sürekliliği sağlanamamış ve sistem sönmüştür. Gaz sıcaklıklarının 2,5 m³/h ve 1,5 m³/h debiler ile yapılan analizlerde gösterdiği eğilimler incelendiğinde, 1,5 m³/h debi ile yapılan analizde gaz çıkış sıcaklığının, 2,5 m³/h debi ile yapılan analize göre ortalama 250°C düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca düşük debili analizde, gaz sıcaklığının kanal içerisinde en yüksek olduğu noktanın 15-25 cm aralığında bir nokta olduğu görülür iken, yüksek debi için en yüksek sıcaklıklar kanalın 30-40 cm’lik bölümünde gerçekleştiği saptanmıştır. Bu durum yanma tepkimelerinin yüksek debilerde kanalın içerisine doğru yürüdüğünü, düşük debilerde ise giriş bölümüne daha yakın bölgelerde gerçekleştiğini göstermektedir. Bunun nedeni düşük debilerde kanal içerisindeki akış hızının da düşük olması ile açıklanabilir. 1,5 m³/h debi ile gönderilen

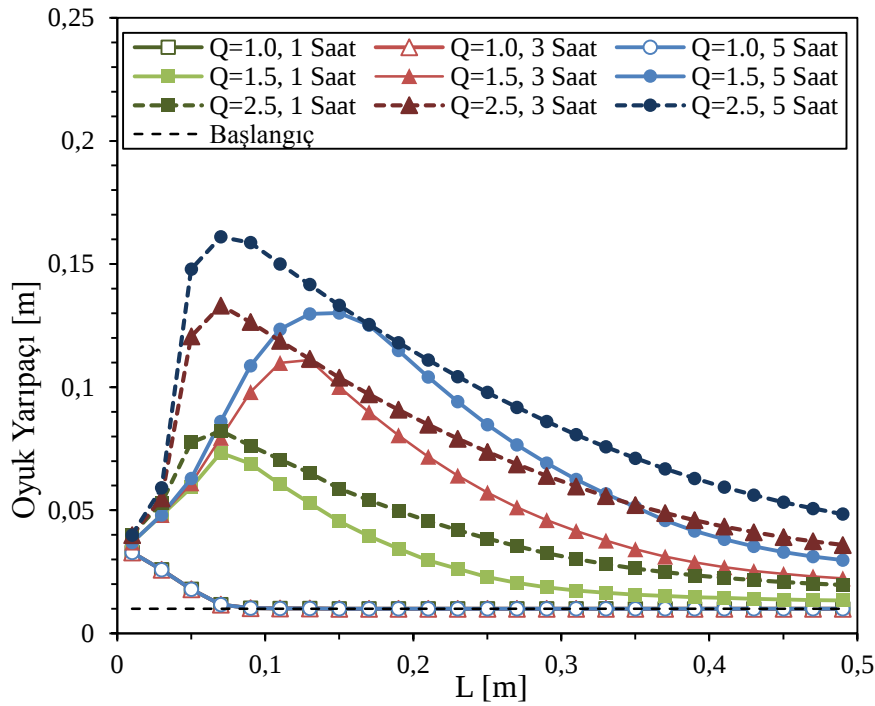
oksijen, kanalın sıcak olan ilk bölümlerinde daha uzun süre kalmaktadır. Yani bir diğer deyişle oksijenin tepkimeye girebileceği daha çok zaman vardır. Debi arttırıldığında, akış hızı da buna bağlı olarak artacağı için gönderilen gazın, kanalın sıcak bölgelerinde geçirdiği zaman azalmaktadır. Gaz içerisinde oksijenin derişimi daha yavaş azaldığı için, tepkimeler de kanalda daha geniş bir alanda gerçekleşebilmektedir. Yüksek akış hızı nedeniyle oksijenin bir kısmı tepkimeye girmeden kanaldan ayrılabilir.

Sıcaklık dağılımlarında gözlemlenen bir başka fark ise kömür içerisinde bulunan noktaların sıcaklık değişimlerinde görülmektedir. Şekil 6.22’de gazlaştırma kanalının 5 cm üzerinde bulunan noktalarda sıcaklıkların zamana bağlı değişimlerinin hem 2,5 m³/h hem de 1,5 m³/h besleme debisi ile elde edilen dağılımları karşılaştırılmıştır. Düşük debide sıcaklık artışının daha yavaş gerçekleştiği görülmektedir. Örneğin Tr15 noktasında 2,5 m³/h debi ile yapılan analizde sıcaklığın 1000°C’ye ulaşması analiz başlangıcından yaklaşık 2,5 saat sonra gerçekleşmiş iken, 1,5 m³/h debi ile yapılan analizde aynı noktada sıcaklık ancak 5 saat sonunda 1000°C’ye çıkabilmiştir.



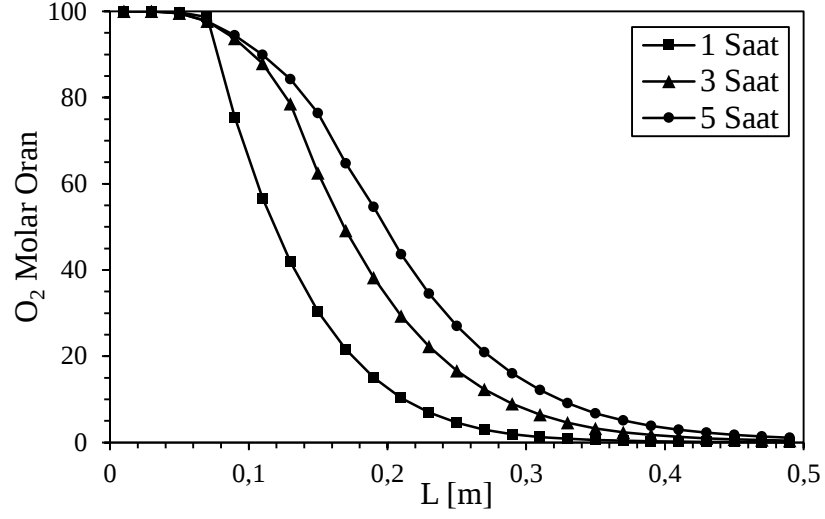
Şekil 6.22: Farklı debilerde kanalın 5 cm üzerinde sıcaklıkların zaman bağlı değişimi.

Kömür içerisinde yavaş sıcaklık artışının bir nedeni de oyuk genişlemesinin düşük debilerde daha yavaş gerçekleşmesidir. Debi değişiminin oyuk gelişimi üzerindeki etkisi Şekil 6.23'te gösterilmiştir. Burada yüksek debilerde oyuğun daha fazla olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Daha yüksek miktarda oksijen beslemesi, daha yüksek miktarda kömür tüketilmesini sağlamaktadır. Özellikle kanalın arka bölümlerinde oyuğun gelişimi incelendiğinde, yüksek debili analizde kanal çıkışına yakın oyuk yarıçapının, düşük debili analize göre çok daha fazla geliştiği görülmektedir. Düşük debili analizlerde, yüksek debili duruma göre kanal boyunca ilerlenildiğinde oyuk yarıçapında daha sert bir düşüş görülmektedir. Bunun nedeni yüksek debilerde sıcak bölgenin daha geniş olması, buna bağlı olarak kanalın arka tarafında da gazlaştırmanın yanısıra yanma tepkimelerinin de devam etmesidir.

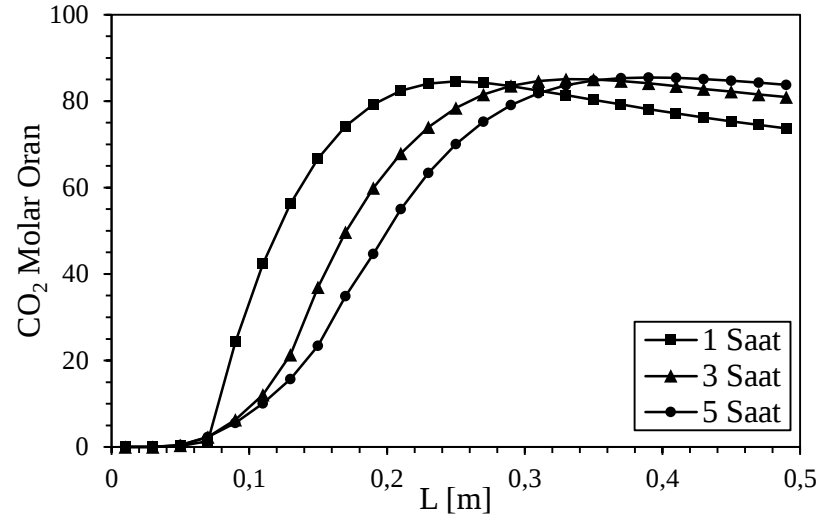


Şekil 6.23: Gazlaştırma debisinin oyuk gelişimine etkisi.

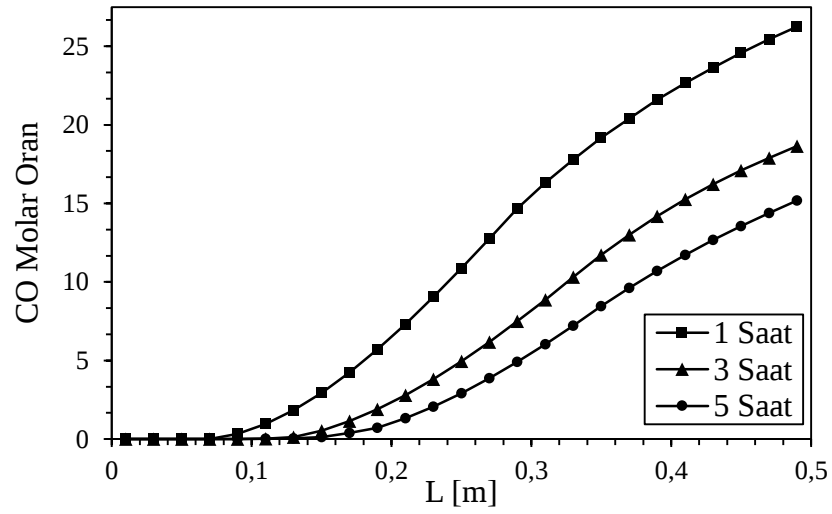
1,5 m³/h oksijen beslemesi ile yapılan analizde kanal boyunca oksijen, karbondioksit ve karbonmonoksit oranının değişimi sırası ile Şekil 6.24, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da farklı zamanlar için verilmiştir. Dağılımlar incelendiğinde, gösterdikleri eğilimlerin önceki analizlerde karşılaşılan eğilimler ile paralel olduğu gözlemlenmektedir. Oksijenin kanal boyunca tüketildiği, karbonmonoksitin ise kanal boyunca farklı hızlarda üretildiği görülmektedir. Karbondioksit ise yanma tepkimelerine bağlı olarak kanalın ilk bölümlerinde artmakta, gazlaştırma tepkimelerine bağlı olarak ise kanalın arka bölümlerinde azalma eğilimi göstermektedir.



Şekil 6.24: Oksijen oranının kanal boyunca değişimi ($Q=1,5 \text{ m}^3/\text{h}$).

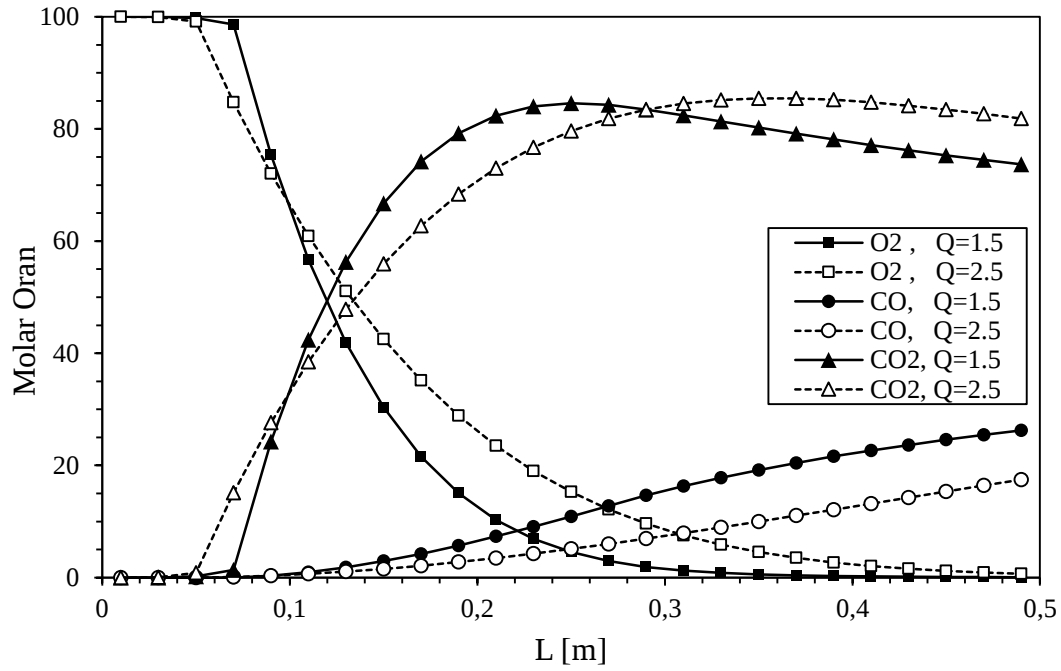


Şekil 6.25: Karbondioksit oranının kanal boyunca değişimi ($Q=1,5 \text{ m}^3/\text{h}$).



Şekil 6.26: Karbonmonoksit oranının kanal boyunca değişimi ($Q=1,5 \text{ m}^3/\text{h}$).

Analizin başlangıcından 1 saat sonra gaz bileşenlerinin kanal boyunca değişimini farklı iki debi değeri için bir arada gösteren grafik Şekil 6.27’de verilmektedir. Bu grafik gazlaştırma işleminin anlaşılması için önemli birkaç durum göstermektedir. Öncelikle yanıcı gaz olan ve elde edilmek istenilen karbonmonoksit miktarına bakıldığında 1,5 m³/h debi ile yapılan analizde çıkışta %27 olan molar oranın 2,5 m³/h debi ile yapılan analizde %17 olduğu görülmektedir. Bir diğer deyişle yapılan debi değişikliği sayesinde elde edilen yapay gazın içeriğindeki yanıcı gaz oranı yaklaşık %60 artış göstermiştir.



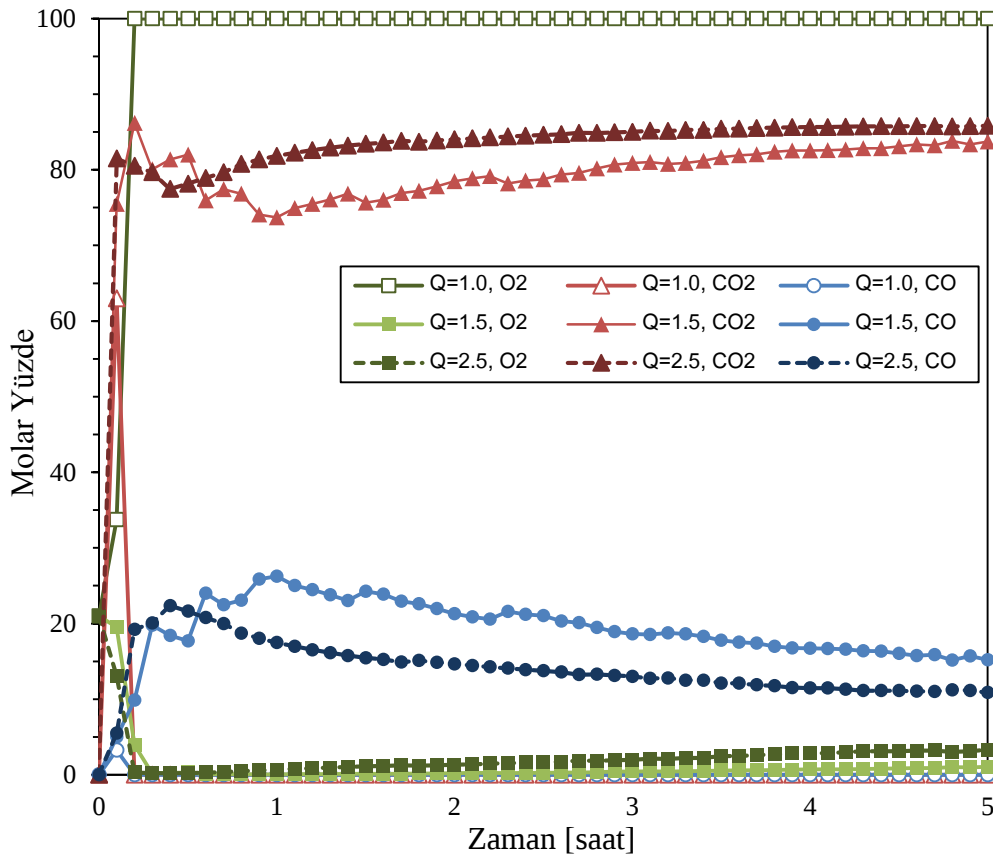
Şekil 6.27: Besleme debisinin bileşenlerin kanal boyunca değişimi üzerinde etkisi.

Bu artışın sebebini anlamak için diğer bileşenlerin kanal boyunca değişimini incelemek gereklidir. Oksijene bakıldığı zaman 2,5 m³/h debi ile yapılan analizde oksijen miktarının %5’in altına düştüğü nokta kanal girişinden yaklaşık 35 cm ileride iken, 1,5 m³/h debi ile yapılan analizde 25 cm içeride oksijen bu değere düşmektedir. Bahsi geçen noktalar aynı zamanda karbondioksit oranının artış eğiliminin durduğu noktalardır.

Yukarıda anlatılan durum göze alınarak yanıcı gaz eldesini arttırmak için iki etmenin önemli olduğu yorumu yapılabilir. Bunlardan ilki, daha önce de tespit edildiği gibi, oksijenin kanal içerisinde ne kadar erken tüketilebildiği ile ilgilidir. İkinci etmen ise yapay gazın oksijensiz olarak, sıcak kömür bloğu içerisinde ne kadar uzun süre kaldığı ile ilgilidir. Yani bir diğer deyişler yapay gazın, Şekil 1.2’de gösterilen indirgenme

evresinde ne kadar uzun süre kalabildiği ile ilgilidir. İndirgenme bölgesinin uzunluğu, yanma bölgesinin kısa tutulması ile arttırılabileceği gibi, doğru kömür bloğu uzunluğu ile çalışılarak da arttırılabilir. Eğer gazlaştırılmak istenen kömür bloğu kısa seçilir ise, yapay gaz indirgenme aşamasını tamamlayamadan sistemden ayrılabilir. Bu nedenle gazlaştırmanın verimli gerçekleşebileceği bir kömür bloğu uzunluğu ve buna bağlı bir besleme debisi olduğu fikri ortaya çıkmaktadır. Gazlaştırma ilerledikçe elde edilen yapay gazın kalitesinin azalması, zamanla kömür içerisindeki yanma önünün çıkışa doğru yaklaşması ve buna bağlı olarak indirgenme bölgesinin kısalması ile de açıklanabilmektedir.

Şekil 6.28’de gazlaştırma kanalı çıkışında yapay gazın bileşiminin zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Bu grafikte zamanla azalan karbonmonoksit miktarı açıkça görülmektedir. Debinin etkisi incelendiğinde, 1,5 m³/h debi kullanıldığında, 2,5 m³/h debi kullanımına göre ortalama %50 daha fazla karbonmonoksit üretildiği görülmektedir. Yüksek debi kullanıldığında, sistemden harcanmadan ayrılan oksijen miktarı da daha fazladır. 1,5 m³/h debi ile yapılan analizde gözlemlenen dalgalanmaların sayısal hatalardan dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir.

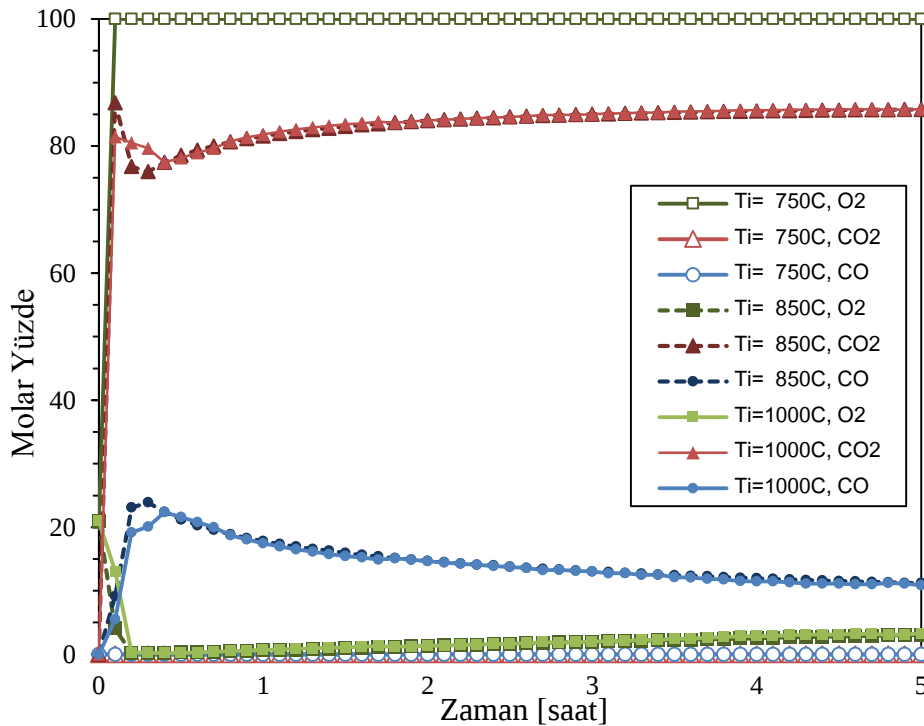


Şekil 6.28: Gazlaştırma debisinin yapay gaz karışımına etkisi.

6.4 Kömür Tutuşturma Enerjisi / Sıcaklık Etkisi

Yeraltında kömür gazlaştırma ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda, gazlaştırma işleminin başlatılabilmesi için öncelikle kömür bloğunun sıcaklığı arttırılmaktadır. Bu işlem genellikle dışarıda propan veya benzeri bir alev kaynağı kullanılarak kömürün yakılması ile yapılmaktadır. Kurgulanan matematik modelde yukarıda anlatılan yakma işleminin uygulanması pratik değildir. Sıcaklığı yükselmiş kömür bloğunu temsil etmesi amacı ile analizin başlangıç şartı olarak, kömür bloğunun gazlaştırma kanalının girişinden 15 cm içeriye uzanan, kömür içerisindeki radyal yöndeki derinliği ise 5 cm olan silindirik bir bölgeye sıcaklık tanımlanmaktadır.

Tutuşturma sıcaklığı olarak tanımlanan bu başlangıç parametresinin analiz sonuçlarına etkisinin görülmesi amacı ile üç farklı sıcaklık değeri kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Kullanılan sıcaklıklar sırası ile 750°C, 850°C ve 1000°C'dir. Yapılan analizlerde 750°C tutuşturma sıcaklığı kullanılması halinde kömür bloğunda yanma devam etmemiş ve kömür bloğu soğumuştur.

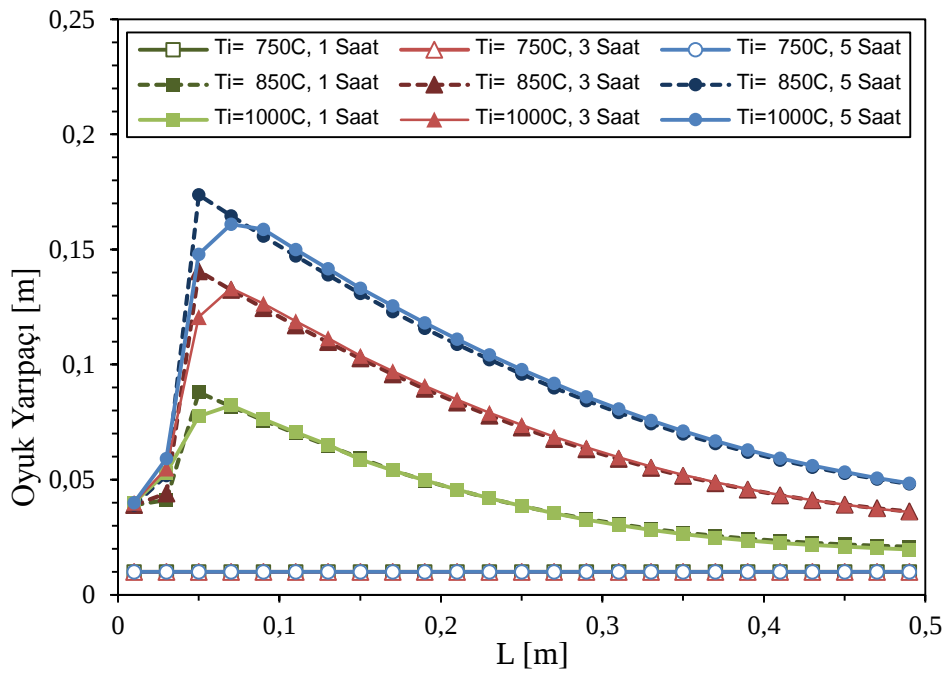


Şekil 6.29: Tutuşturma sıcaklığının yapay gaz bileşimi üzerinde etkisi.

Başlangıç şartı olarak farklı sıcaklıklar kullanılarak yapılan analizler sonucunda yapay gaz bileşiminin zamana bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 6.29'da verilmiştir. Buradan da görüleceği üzere 750°C ile yapılan analiz sonucunda yanma hızlı bir şekilde sona ermiş ve analizin geri kalanında çıkıştan %100 oksijen alınmıştır.

Tutuşturma sıcaklığı olarak 850°C ve 1000°C kullanılan analizlerde ortaya çıkan yapay gaz bileşimleri ise nerede ise birebir örtüşmektedir. Bu iki parametrenin bileşenler üzerindeki tek etkisi, analizin başlangıcında yaşanan birkaç salınım farkından ibarettir.

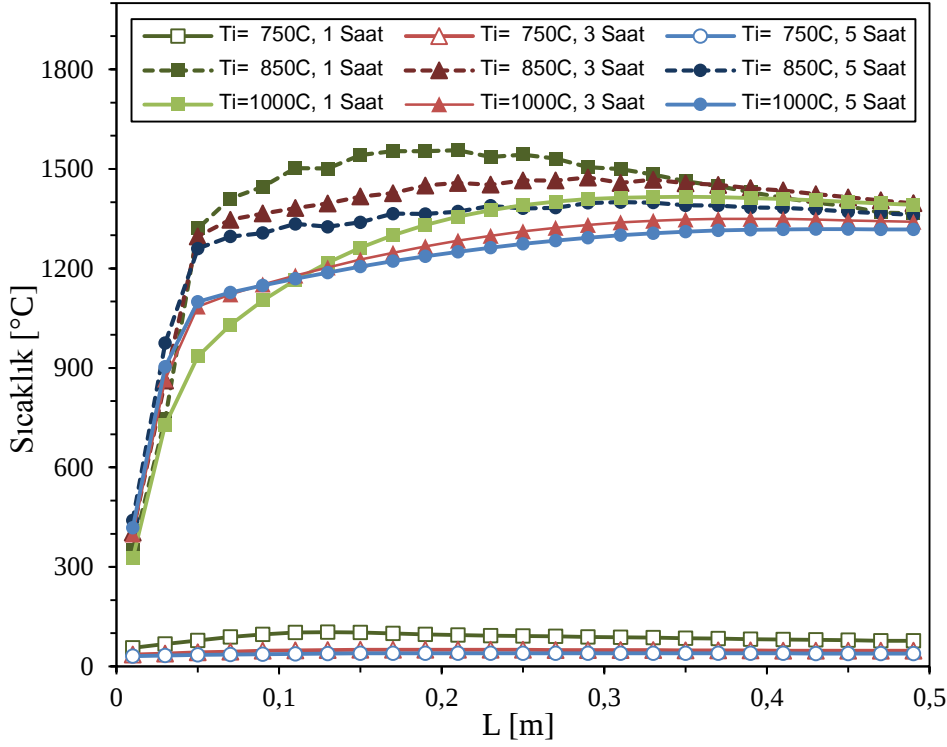
şekil 6.30'da ise oyuk gelişiminin farklı başlangıç sıcaklıklarında nasıl geliştiği gösterilmiştir. Açıkça belli olmaktadır ki ilk tutuşturma sıcaklığının yeraltında kömür gazlaştırma sürecine etkisi nerede ise yoktur. Oyuk gelişiminde görölen az miktardaki farklılıkların ise sayısal hesaplamalarda oluşan kesme hatalarından oluştuğu düşünölmektedir.



şekil 6.30: Tutuşturma sıcaklığının oyuk gelişimine etkisi.

Farklı tutuşturma sıcaklığları kullanıldığında kanal boyunca gaz sıcaklıklarının değişimini gösteren grafik şekil 6.31'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde tutuşturma sıcaklığı olarak 850°C kullanıldığđ durumda gaz sıcaklığının kanalın ön bölgelerinde yaklaşık olarak 300°C yüksek olduğu görölmektedir. Kanalın çıkışına doğru ise sıcaklıklar pratik olarak aynı seviyeye gelmektedirler. Bu durumun neden kaynaklandığđ anlaşılamamıştış ve sayısal bir hata olduğu düşünölmektedir.

Yukarıda ele alınan analizler sırası ile eksenel ve radyal yönde 15×5 cm'lik sıcak bölge ile yapılmıştış. Bunun dışında 5×5 cm ve 5×15 cm tutuşturma bölgeleri kullanılarak da deneyler yapılmış, ancak tüm bu analizlerde gazlaştırmanın devam etmediği ve kömür bloğunun hızla soğuduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.31: Tutuşturma sıcaklığının gaz sıcaklığına etkisi.

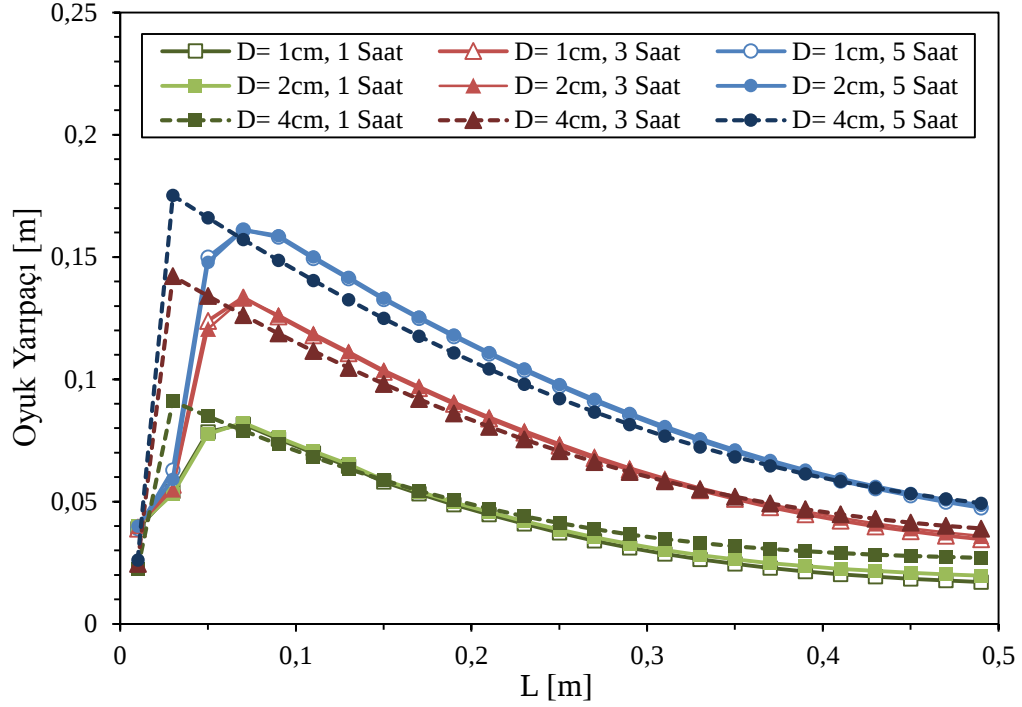
6.5 Gazlaştırma Kanalı Büyüklüğünün Etkisi

Yapılan analizlerde kullanılan bir parametre de başlangıçta açılan gazlaştırma kanalının çapıdır. Kanal çapı için literatürde her deney ve kömür boyutu için oldukça farklı yaklaşımlar ve değerler kullanılmaktadır. Yürütülen deneysel çalışmalarda ise gazlaştırma kanalı 1 cm ve 2,2 cm çaplı matkap uçları kullanılarak açılabilir. Kurulan matematik modelde açılan gazlaştırma kanal çapı parametresinin sürece etkisini görebilmek amacı ile 1 cm, 2 cm ve 4 cm değerleri ile analizler yapılmıştır.

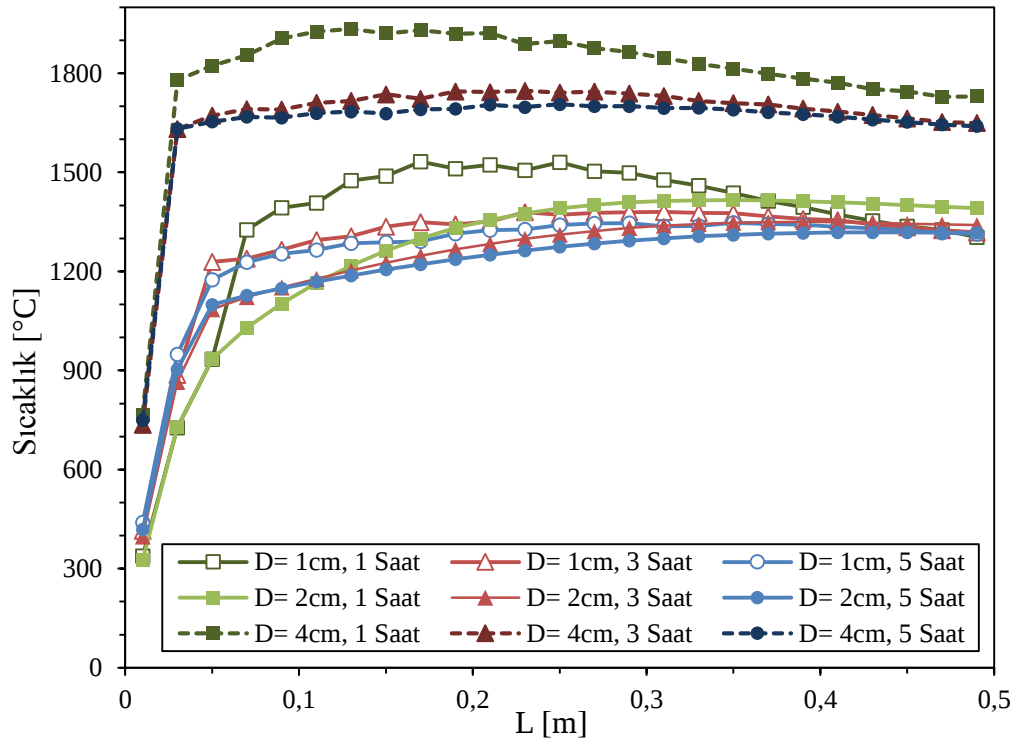
Şekil 6.32’de farklı gazlaştırma kanalı büyüklüklerinin oyuk gelişimine etkisi görülmektedir. Yapılan analizler göstermektedir ki başlangıç kanal boyutunun, oyuk gelişimi üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Her üç durumda da oyuğun zamana bağlı gelişimi neredeyse aynı olmuştur.

Farklı gazlaştırma kanalı yarıçapları kullanılarak yapılan analizlerde gaz sıcaklıklarının kanal boyunca değişimini gösteren grafik Şekil 6.33’de verilmiştir. 2 cm ve 1 cm kanal çapı ile başlatılan analizlerde sıcaklık değişimleri benzerlik göstermektedir ancak 1 cm kanal çapı ile yapılan analizler sonucu elde edilen gaz sıcaklıklarının, kanalın ön kısımlarında yaklaşık olarak 100°C daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kanal çapı 4 cm olarak başlatılan analizde ise gaz sıcaklıkları

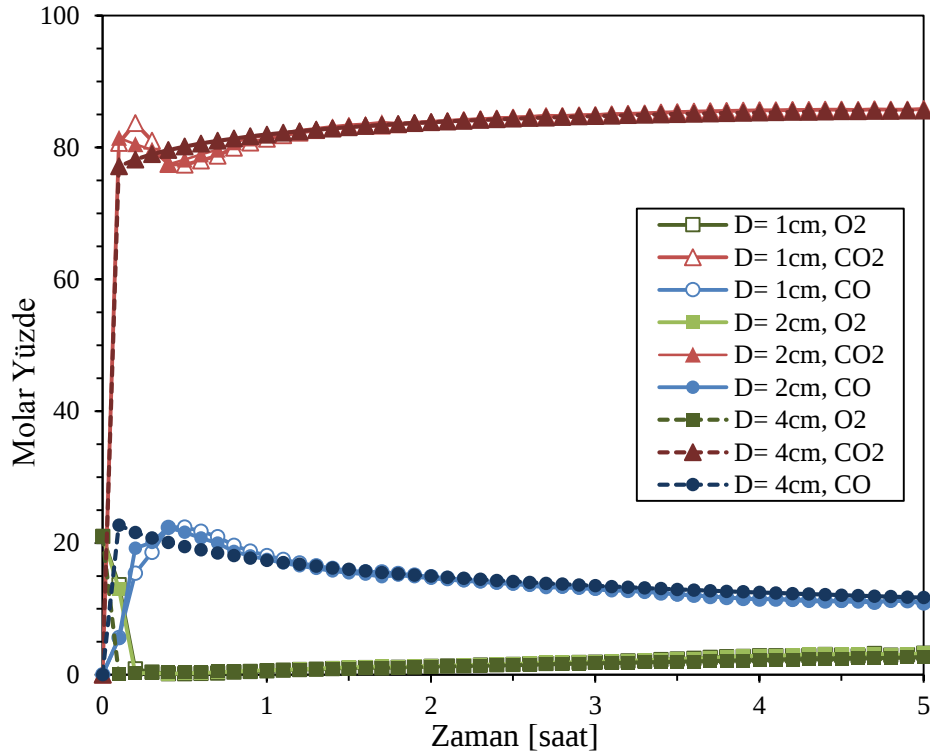
anlamlandırılmayacak şekilde yüksek olmaktadır. Bu analizde gaz sıcaklığının 1500°C'nin altına düşmediği, en yüksek noktalarda ise 1900°C'yi geçtiği görülmektedir. Bu sonuç elbette ki gerçekçi değildir.



Şekil 6.32: Başlangıç kanal boyutunun oyuk gelişimine etkisi.



Şekil 6.33: Başlangıç kanal boyutunun gaz sıcaklığı üzerinde etkisi.



Şekil 6.34: Başlangıç kanal boyutunun yapay gaz bileşimi üzerinde etkisi.

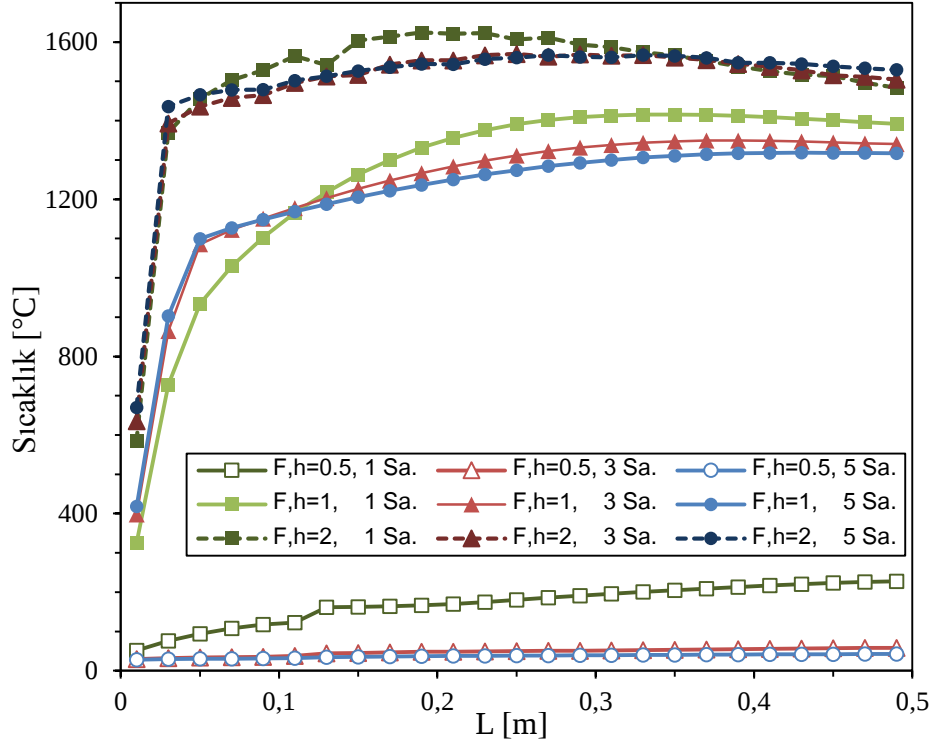
Şekil 6.34'te ise başlangıç kanal çapının yapay gazın bileşimine etkisi görülmektedir. Elde edilen sonuçlar açıkça göstermektedir ki başlangıçta gazlaştırma çapının deney süresince elde edilen yapay gazın bileşimine hiçbir katkısı yoktur.

6.6 Isı Taşınım Faktörünün Etkisi

Yeraltında kömür gazlaştırma sürecinde kömür yüzeyi ile gaz fazı arasında gerçekleşen ısı taşınımının belirlenmesi oldukça güçtür. Literatürde bu konuya yönelik yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle matematik model içerisinde ısı taşınımının, kullanılan parametrelere göre doğru bir şekilde modellenebilmesi için bir düzeltme katsayısı –ısı taşınım faktörü– eklenmiştir. Normal çalışma şartlarında herhangi bir düzeltmeye ihtiyaç duyulmamaktadır ve bu değer 1'dir. Yapılan çalışmalar da bu parametre için 0,5 ve 2 değerleri kullanılarak analizler yapılmış ve sonuçları üzerinde tartışılmıştır.

Şekil 6.35'te farklı ısı taşınım faktörleri kullanılarak yapılan analizlerde elde edilen gaz sıcaklıklarının kanal boyunca dağılımları karşılaştırılmıştır. Isı taşınım faktörünün 1'den 2'ye çıkarılması halinde gaz sıcaklıklarının ortalama olarak 300°C arttığı ve 1400-1600°C kuşağında seyrettiği görülmektedir. Isı taşınımının yükselişi, yüzey tepkimeleri sonucunda ısınan yüzeyden gaza olan ısı geçişinin de artması anlamına

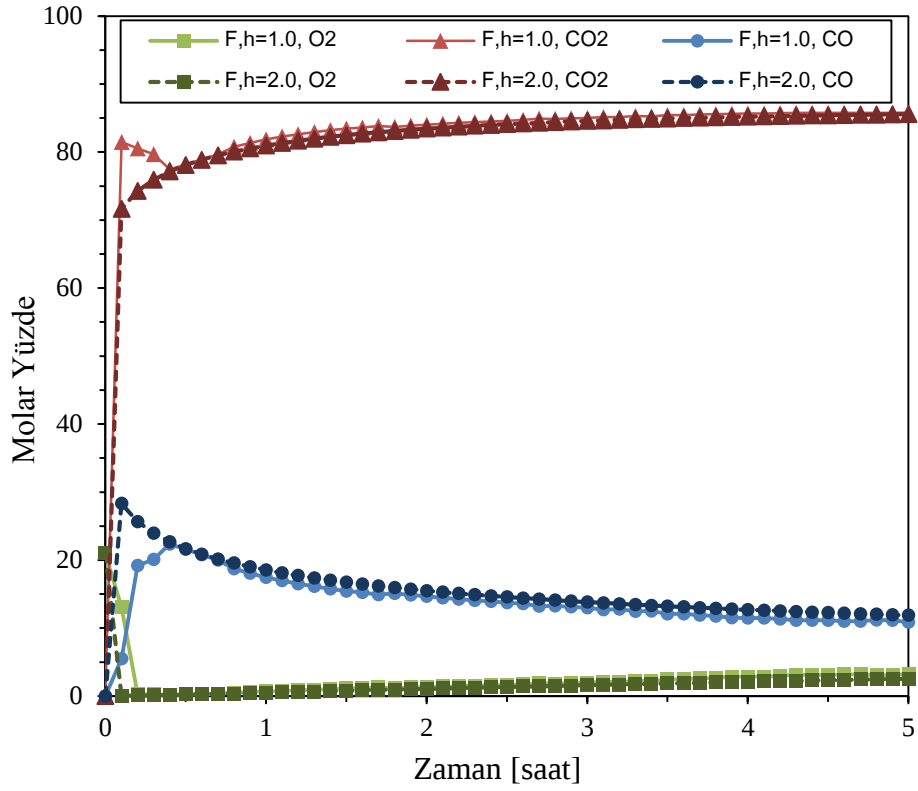
gelmektedir. Isı kömür içerisinde hapsolmak ve kömür içerisinde yayılmak yerine gaza geçmektedir. Bunun neticesinde sıcak gaz ise, yine yüksek ısı taşınımı etkisi altında, kanalın soğuk olan çıkışa yakın yüzeylerini ısıtmakta, böylece sıcaklığı düşmektedir. Isı taşınımının etkisi yarıya düşürüldüğünde ise gazın ısınmadığı ve kömürde yanmanın gelişmediği görülmektedir.



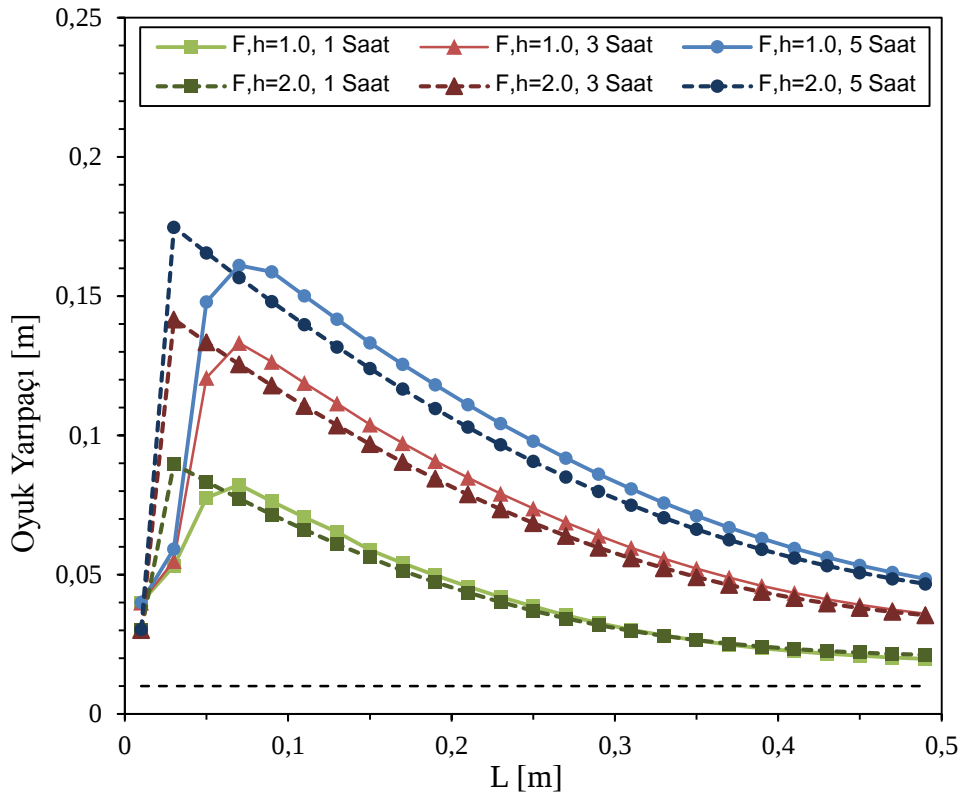
Şekil 6.35: Isı taşınım faktörünün gaz sıcaklığı üzerindeki etkisi.

Süreç sonunda elde edilen yapay gazın bileşiminin ise ısı taşınımından önemli boyutlarda etkilenmediği Şekil 6.36'da görülmektedir. Isı taşınım faktörünün 2 olduğu durumda, elde edilen yüksek sıcaklıklara bağlı olarak tepkime hızları da bir miktar artmış ve dolayısı ile üretilen gaz miktarında artış gözlemlenmiştir. Bunun dışında ısı taşınımının gelen madde miktarına ya da tepkimelere doğrudan herhangi bir etkisi olmaması nedeni ile gazlaştırma işleminin işleyişinde bir değişige sebep olmamaktadır.

Şekil 6.37'de ise farklı ısı taşınım faktörleri kullanılarak elde edilen oyuk şekilleri gösterilmektedir. Buradan da görülmektedir ki gazlaştırma işlemi benzer bir şekilde devam etmektedir. Isı taşınım etkisinin artırıldığı durumda yükselen sıcaklıklara bağlı olarak kanalın girişe yakın kısmında kömürün daha çok tüketildiği, kanalın ilerleyen kısımlarında ise diğer duruma göre daha az oksijen derişimi nedeni ile oyuk gelişiminin bir miktar daha az olduğu söylenebilir.



Şekil 6.36: Isı taşınım faktörünün yapay gaz bileşimi üzerinde etkisi.

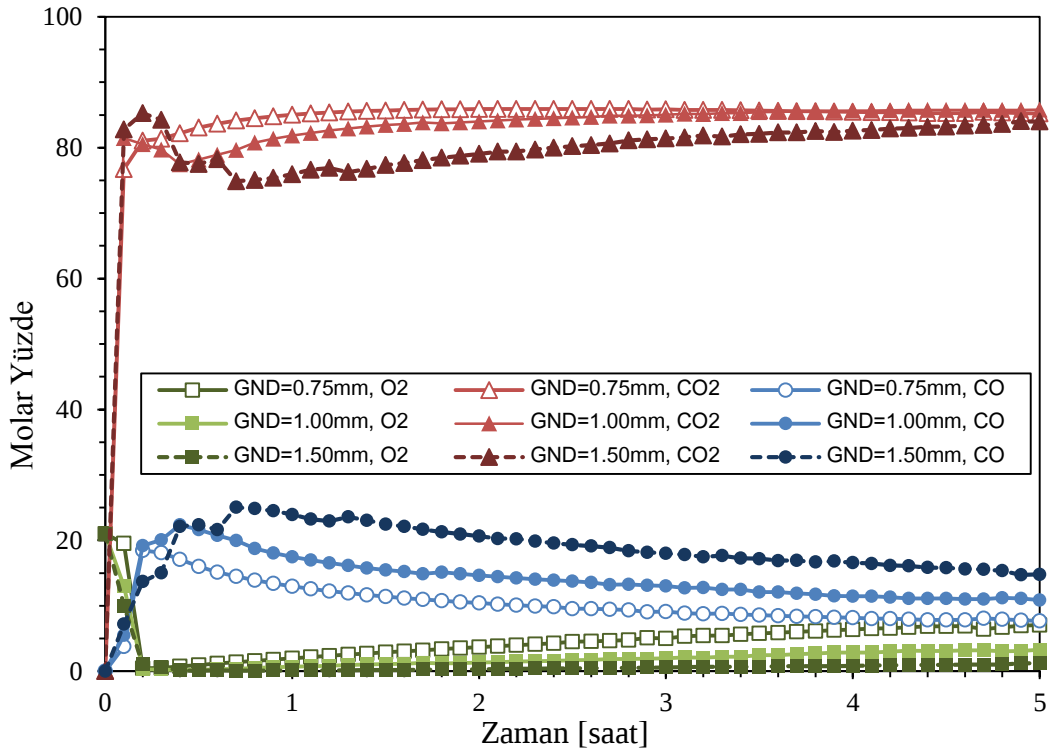


Şekil 6.37: Isı taşınım faktörünün oyuk gelişimi üzerinde etkisi.

6.7 Gaz Nüfuz Derinliği Parametresinin Etkisi

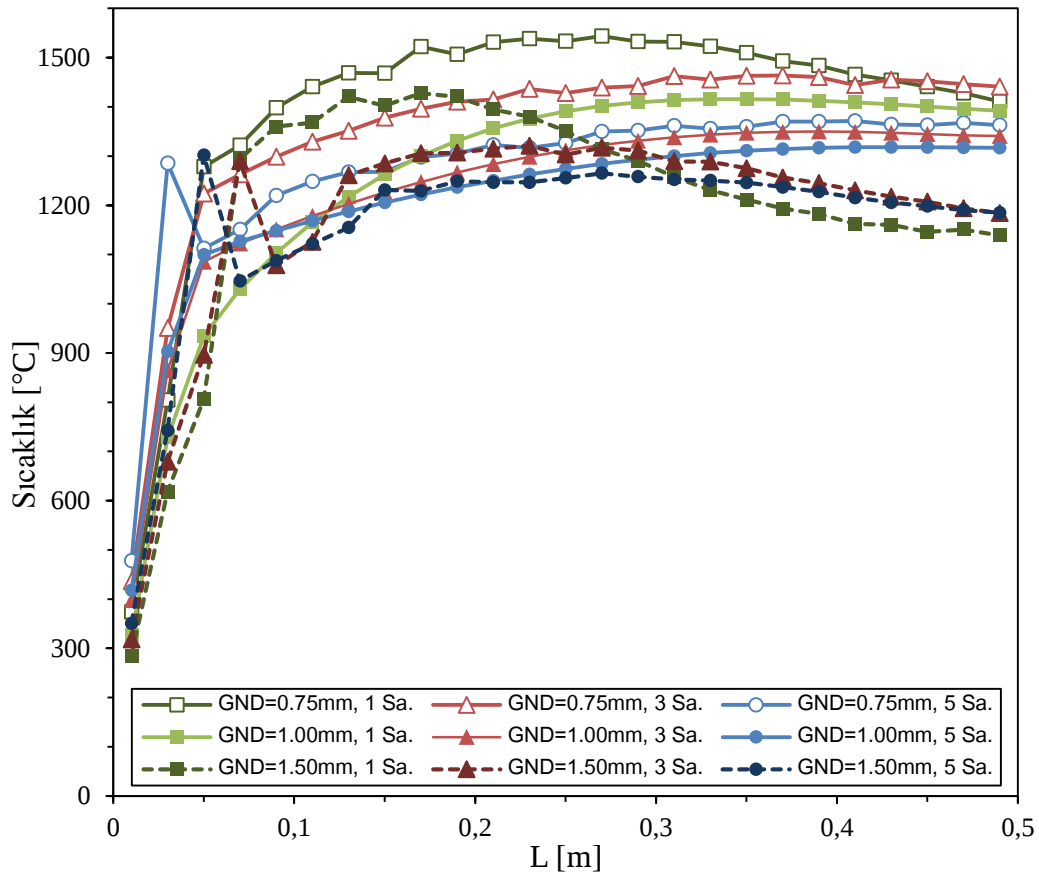
Yapılan çalışmada, daha önce Bölüm 2’de anlatıldığı üzere yakılan kömürün gözenekli bir yapıda olduğu düşünülmüştür. Yani kanal içerisindeki gaz, kömürün içerisine nüfuz edebilmektedir. Kömür içerisindeki gaz derişiminin, söz konusu nüfuz derinliğine kadar kanalda bulunan gaz derişimi ile aynı olduğu kabulü yapılmaktadır. Gaz Nüfuz Derinliği olarak adlandırılan bu parametre, doğrudan gazın kömür ile tepkimeye girebileceği yüzey alanını belirlemektedir.

Yapılan analizlerde gaz nüfuz derinliğinin 1 mm olduğu kabul edilmiştir. Parametrenin çözüme olan etkisinin incelenebilmesi adına gaz nüfuz derinliği 0,75 mm ve 1,5 mm kullanılarak analizler yapılmıştır. Gaz nüfuz derinliği parametresi, kurulan matematik model içerisinde Arrhenius parametreleri dışında tepkimelere direkt etkisi olan tek parametredir. Şekil 6.38’de farklı değerlerin kanal çıkışında yapay gaz bileşimine nasıl etki ettiği görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde rahatlıkla görülmektedir ki gaz nüfuz derinliğinin artışı, tepkime hızlarını da doğrudan etkilemektedir. Düşük gaz nüfuz derinliğinde oksijen tamamen tüketilememekte ve düşük bir karbonmonoksit derişimi elde edilmektedir. Bu parametrenin yükseltilmesi ise tepkimeleri hızlandırmakta ve Boudouard tepkimesi yardımı ile daha fazla karbonmonoksit elde edilmesini sağlamaktadır.



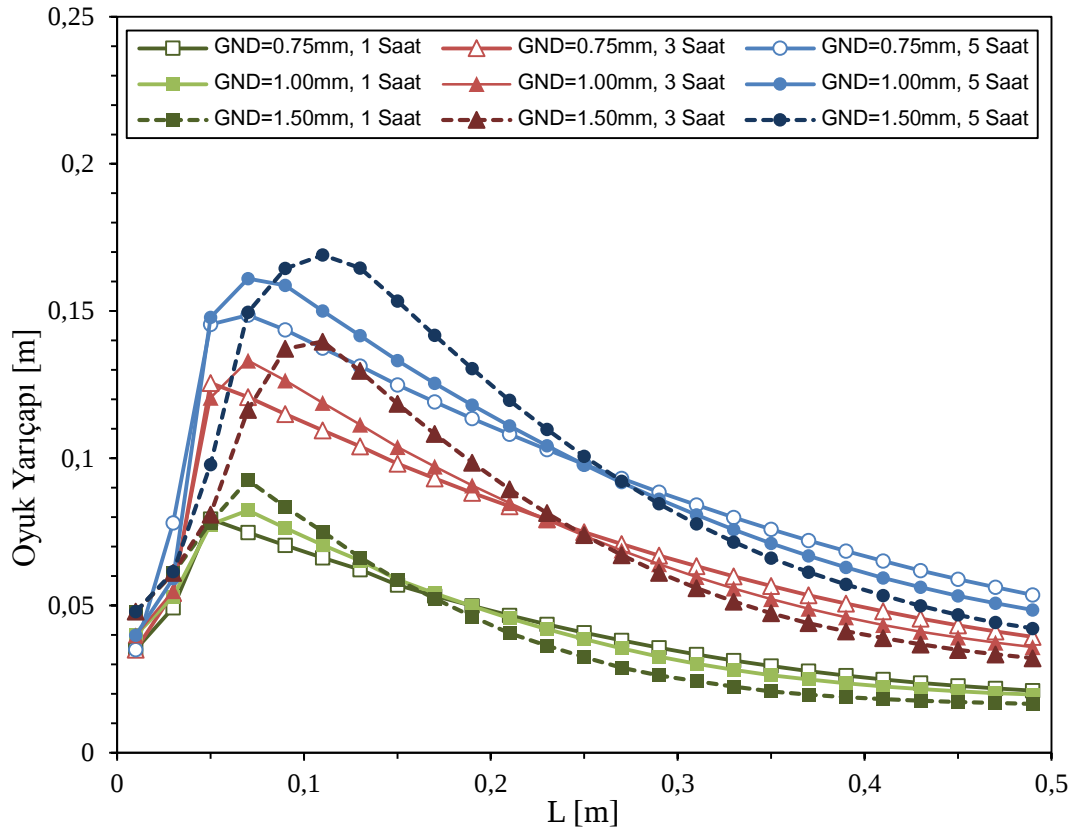
Şekil 6.38: Gaz nüfuz derinliğinin yapay gaz bileşimi üzerinde etkisi.

Şekil 6.39’da farklı gaz nüfuz derinlikleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda kanal içerisinde gaz sıcaklıklarının değişimi karşılaştırılmıştır. Yüksek gaz nüfuz derinliği nedeni ile oksijenin tüketilmesi kanalın ön bölümlerinde tamamlanmaktadır. Bu nedenle kanalın ön bölümü ile arka bölümü arasında kayda değer bir sıcaklık farkı oluşmaktadır. Gaz nüfuz derinliği azaltıldıkça, gaz sıcaklıklarının arttığı görülmektedir. Bu durumun ilk bakışta anlamsız görünse de gerçekleşen olayın doğru yorumlanabilmesi için gazlaştırma tepkimelerinden bazılarının (örneğin Boudouard tepkimesi) endotermik olduğunu unutmamak gerekir. Boudouard tepkimesinin daha az miktarlarda gerçekleşmesi nedeni ile sıcaklığın düşmesi sağlanamamaktadır. Ayrıca eğer oksijen tam olarak tüketilmemiş ise üretilen karbonmonoksit yeniden yanmaktadır. Kömür yanmasının tersine, homojen bir tepkime olan karbonmonoksit yanması tamamen gaz fazında gerçekleştiği için gaz sıcaklığının artışına etkisi daha fazladır. Yüksek gaz nüfuz derinliği kullandığında ise oksijen hızlı bir şekilde tüketilmekte, daha sonra ise Boudouard tepkimesi tüm kanal boyunca (hem de normalde olduğundan daha etkin bir şekilde) gerçekleşerek sıcaklıkları düşürmekte, karbonmonoksit miktarını arttırmaktadır.



Şekil 6.39: Gaz nüfuz derinliğinin gaz sıcaklığı üzerindeki etkisi.

Şekil 6.40'ta ise oyuk gelişiminin gaz nüfuz derinliğinden nasıl etkilendiği görülebilmektedir. Oyuk şekillerinin gaz nüfuz derinliği gaz nüfuz derinliği arttıkça kanalın ilk yarısında daha geniş olduğu ve kanalın devamına doğru yarıçapın hızla azaldığı görülmektedir. Gaz nüfuz derinliği azaldığında ise kanalın ön kısımlarının daha az büyüdüğü, buna karşılık kanalın arka bölümlerinin daha geniş olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, gaz nüfuz derinliğindeki artışa bağlı olarak artan tepkime yüzeyi ile kanalın ilk bölümlerinde gazın daha fazla tepkimeye girmesi ve kanalın devamına tepkimeye girecek daha az maddenin gitmesi olarak gösterilebilir. Benzer şekilde gaz nüfuz derinliğinin azalması ile tepkime yüzeyleri de azalacak ve kanalın arka bölümlerine daha fazla oksijen ulaşarak bu bölümlerde yanma sağlayabilecektir.



Şekil 6.40: Gaz nüfuz derinliğinin oyuk gelişimine etkisi.

7. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, yeraltında kömür gazlaştırma sürecinin anlaşılabilmesi amacı ile İTÜ Makina Fakültesi, Yanma Laboratuvarı'nda kurulan deney düzeneği yardımı ile çeşitli deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Deneylerde, Malkara Pirinççeşme havzasından çıkarılan kömür blokları kullanılmıştır.

Yapılan deneylerde kullanılan temel gazlaştırma ajanı saf oksijen olmuştur. Gazlaştırma deneylerinde elde edilen yapay gazın içeriği ortalama %25-35 karbonmonoksit, %15-20 hidrojen ve %2-3 metan gazından oluşmaktadır. Bu değerler göstermektedir ki Pirinççeşme linyitleri gazlaştırmaya elverişlidir. Çalışmalar esnasında, gazlaştırma ajanı olarak saf oksijenin yanında su buharı beslemesi de yapılmış ve bu durumda elde edilen yapay gazın kalitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmaların devamı durumunda, literatürde üzerinde çalışmalar yapılan iki adımlı (oksijen – su buharı) gazlaştırma sürecinin Pirinççeşme linyitlerine uygulanabilirliğinin araştırılması ve bu yöntemin geliştirilmesi hedeflenmelidir. Bunun yanı sıra kurulan deney düzeneği farklı kömür tiplerinin gazlaştırılmasına da uygundur. Farklı havzalardan, farklı özelliklere sahip kömürler üzerinde çalışma yapılması, kömür özelliklerinin gazlaştırma sürecine etkisini göstermesi açısından önemli bir çalışma konusudur.

Deneysel çalışmalara paralel olarak YKG sürecinin sayısal benzetiminin yapılabilmesi amacı ile bir matematik model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, farklı çalışma parametreleri kullanılarak test edilmiş ve bu parametrelerin gazlaştırma sürecine etkileri üzerinde tartışılmıştır. Bunun yanı sıra kurgulanan model hem yürütülen deneysel çalışmaları hem de literatürde bulunana deneysel çalışmaların benzetimi için kullanılmıştır.

Matematik model kullanılarak yapılan parametre (gazlaştırıcı, debi, tutuşturma sıcaklığı v.b.) çalışmaları sonucunda kurgulanan matematik modelin, yalnızca karbondan oluşan koklaşmış kömür gazlaştırmasının modellenmesinde başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu parametre çalışmaları sonucunda kömür gazlaştırma işleminin en iyi şekilde yürütülebilmesi için gazlaştırma ajanlarının besleme debisi,

oksijen/su buharı oranı gibi çalışma parametrelerinin belirli aralıklarda kalması gerektiği tespit edilmiştir. Örneğin oksijen besleme debisi düşürüldüğünde, elde edilen gaz kalitesinin arttığı, ancak debi düşürülmeye devam edildiğinde gazlaştırmanın başarısız olabileceği görülmüştür.

Matematik model sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırıldığında ise modelleme sonuçları ile deneysel verilerin tam olarak örtüşmediği görülmektedir. Özellikle yapay gazın içerisinde bulunan hidrojen miktarı, kurgulanan matematik model ile tahmin edilemez bir durumdadır. Ayrıca YKG sürecinin uygulanacağı kömürün özellikleri de matematik modelde kendisine yer bulamamıştır.

Yeraltında kömür gazlaştırma süreci, bu çalışmada ele alınandan daha kapsamlı mekanizmaları içerisinde barındıran bir süreçtir. Matematik modelin doğruluğunu arttırmak amacı ile bu mekanizmaların da modellemelerinin yapılması gerekir. Çalışmayı ilerletmek amacı ile yapılabilecek en önemli eklentiler şunlar olarak belirlenmiştir:

- Kömür neminin ve buharlaşma modelinin eklenmesi,
- Kuru kömürün pirolizi ve kok oluşumu.

Bu modeller, kömürün yaklaşık analizi sonucu yardımıyla elde edilen nem, uçucu, kül ve sabit karbon oranlarını kullanacaklardır. Böylece kömür özellikleri de doğrudan gazlaştırma sonuçlarına etki edebilecektir.

Matematik modelde yapılabilecek bir başka iyileştirme ise modelin üç boyutlu Kartezyen koordinatlara taşınması ile sağlanabilir. Bu işlem sayesinde gazlaştırma kanalı içerisinde gerçekleşen doğal taşınım ve türbülans gibi akış olaylarının hesaplanabilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Burton, E., Friedmann, S.J. ve Upadhye, R.** (2007). Best Practices in Underground Coal Gasification. Lawrence Livermore National Laboratory
- [2] **Friedmann, S. J., Burton, E. ve Upadhye, R.** (2006). LLNL Capabilities in Underground Coal Gasification, Lawrence Livermore National Laboratory, 1-11.
- [3] **Higman, C. ve Van Der Burgt, M.** (2008). Gasification. (2. Edition) (Sf. 1-9). Oxford, ABD.
- [4] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Temiz Kömür Teknolojileri, s.30. (2010).
- [5] **Klimenko, A.Y.** (2009). Early Ideas in Underground Coal Gasification and Their Evolution. *Energies* 2(2), 456-476
- [6] **URL-1** < http://www.zaman.com.tr/ekonomi_tki-calismalari-hizlandirdi-komurden-gaz-uretilecek_1142660.html > erişim tarihi: 16.03.2015.
- [7] **URL-2** < http://www.engineeringx.pitt.edu/uploadedFiles/Coal_Conference/Pl2-3%20-%20Mustafa%20Ziypak.pdf >, alındığı tarih: 16.03.2015.
- [8] **Bhutto, W.A., Bazmi, A.A. ve Zahedi, G.** (2013). Underground Coal Gasification: From Fundamentals to Applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 39 (2013) 189-214.
- [9] **Shafirovich, E. ve Varma, A.** (2009). Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, 48, 7865-7875.
- [10] **Bhutto, W. A., Bazmi, A. A. ve Zahedi, G.** (2013). Underground Coal Gasification: From Fundamentals to Applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 39 (2013) 189-214.
- [11] U.S. Department of Energy, (1978). Underground Coal Conversion Program, Volume III Resources, DOE/ET-0008/3, UC-90C, Washington, D.C.
- [12] **Mastalerz, M., Droloniak, A., Parke, M., Rupp, J.** (2011), Site Evaluation Of Subsidence Risk, Hydrology and Characterization of Indiana Coals For UCG.

- [13] **Shackley, S., Mander, S. ve Reiche, A.** (2006). Public perceptions of underground coal gasification in the United Kingdom. *Energy Policy* 2006; 34(18), doi:10.1016/j.enpol.2005.07.010
- [14] **Saliyeva, S.,** (2014), Economic Analysis of Underground Coal Gasification End Product Market: Australian Case Study. The 12th European Gasification Conference.
- [15] Economic Commission For Europe Coal Committee, (1976). Report of The Symposium on Gasification And Liquefaction of Coal, Düsseldorf.
- [16] **Shimada, S., Ohga, K., Tamari, A and Ishii, E.** (1995). Underground Coal Gasificaton-How Much Does It Cost? (Case Study in Japan) MinChem'95, The Fifth Symposium on Mining Chemistry İstanbul, Türkiye.
- [17] **Krantz, W. B. ve Gunn, R.D.** (1983). Underground Coal Gasification: The state of the Art, AIChE Symposium Series 226, Vol. 79.
- [18] **Dossey, J. L.** (1976). Underground Coal Gasification Technology in the USSR, Sandia Laboratories, Albuquerque.
- [19] **Shirazi, A.S., Mmbaga, J.P., Hayes, G. ve Hayes, R.E.** (2011) Modelling Cavity Growth during Underground Coal Gasification. Excerpt from the Proceedings of the 2011 COMSOL Conference in Boston.
- [20] **Zamzow, K.L.** (2010). Underground Coal Gasification. History, Environmental Issues, And The Proposed Project at Beluga, Alaska, Center for Science in Public Participation.
- [21] **Schrider, L.A., Pasini III, J.** (1973). Underground Gasification of Coal-Pilot Test, Hanna Wyoming, Fifth Syntetic Pipeline Gas Symp., Chicago
- [22] **Campbell, G.C., Brandenburg, C.F. Boyd, R.M.** (1974). Preliminary Evaluation of Underground Coal Gasification At Hanna Wyoming, U.S. Dep. Of Interior, Burean of Mines Technical Progress Rept., TPR 82
- [23] **Fischer, D.D., Boysen, J.E., Gunn, R.D.** (1976). Energy Balance fort he Second Underground Coal Gasification Experiment Hanna, Wyoming, Trans. SPE-AIME, Vol. 262.
- [24] **Bartke, T.C., Dockter, L., Sterner, T.E., Virgona, J.E., Wojdac, L.F.** (1978) Status Report on the Hanna III and Hanna IV UCG Experiments, Proc. of the Fourth Underground Coal Conversion Conference, Steaniboat.

- [25] **Bartke, T.C., Dockter, L., Sterner, T.E., Virgona, J.E.** (1978). Status of the Fourth UCG Experiment at Hanna Wyoming, SPE 7510, Presented at 53rd. Annual Fall Meeting of SPE-AIME, Houston.
- [26] **Moody, M.M.** (1978). Interpretations of Field Hydraulic Tests In Explosion-Fractured Coal: Hoe Creek, Site Characterization To Experiment No.1, Lawrence Livermore Laboratory, UCL-52438.
- [27] **Thorness , C.B., Cena, R.J. Aiman, W.R., Hill, R.W., Stephens, D.R.** (1978). Hoe Creek NO.2: UCG Experiment With Air and Oxygen /Steam Injection Periods, SPE 7512, presented at 53rd. Annual Fall Meeting of SPE-AIME, Houston.
- [28] **Hill, R.W., Thorness, C.B. Cena, R.J., Aiman, W.R., Stephens, D.R.** (1980), Results From the Third LLL UCG Experiment at Hoe Creek, Proc. of the Sixth Underground Coal Conversion Symp., Shangri-La.
- [29] **Thorness, C.B., Creighton, J.R.** (1983). Review of UCG Field Experiments at Hoe Creek, AIChE Symp. Series. 226, Vol.79.
- [30] **Burwell, E.L.** (1980). The Department of Energy Underground Coal Conversion Program, Accomplishments and Strategy, Proc. Sixth Underground Coal Conversion Symp., Afton.
- [31] **Hill, R.W., Thorness, C.B.** (1983). The Large Block Experiments in Underground Coal Gasification, AIChE Symp. Series, 226, Vol.79.
- [32] **Url-3** < <http://www.ucgassociation.org/index.php?option=comcontent&view=article&id=162&Itemid=413> > alındığı tarih, 10.04.2014.
- [33] **Moorhouse, J., Huot, M., McCulloch, M.** (2010). Underground Coal Gasification:Environmental Risks and Benefits, A Preliminary Review by the Pembina Institute, Canada.
- [34] **Url-4** < http://www.ai-ees.ca/media/6876/swan_hills.pdf >, alındığı tarih: 12.07.2014.
- [35] **Url-5** < <http://swanhills-synfuels.com/about-us/history/> >, alındığı tarih: 12.07.2014.
- [36] **Blinderman, M. S., Jones, R. M.** (2002). The Chinchilla IGCC Project to Date: Underground Coal Gasification and Environment, Gasification Technologies Conference, San Francisco, USA.
- [37] **Url-6** < <https://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/presentations/UCG-09-16-08.pdf> >, alındığı tarih: 13.08.2014.

- [38] **Glaser, R.R. ve Johnson, L.A.** (1986). Physical Simulation of Underground Coal Gasification in an Eastern Bituminous Coal. Proceedings of the Twelfth Annual Underground Coal Gasification Symposium. pp. 408-418.
- [39] **Liu, S., Wang, Y.Y., Zhao, K. ve Yang, N.** (2009). Enhanced-hydrogen gas production through underground gasification of lignite. Mining Science and Technology. Vol.19, pp 389-394.
- [40] **Daggupati, S., Mandapati, R.N., Mahajani, S.M., Ganesh, A., Mathur, D.K., Sharma, R.K. ve Aghalayam, P.** (2010). Laboratory Studies on Combustion Cavity Growth in Lignite Coal Blocks in the Context of Underground Coal Gasification, *Energy*. Vol.35, pp. 2374-2386.
- [41] **Stanczyk, K., Smolinski, A., Kapusta, K., Wiatowski, M., Swiadrowski, J., Kotyrba, A. ve Rogut, J.** (2010). Dynamic Experimental Simulation of Hydrogen Oriented Underground Gasification of Lignite. *Fuel*. Vol.89, pp.3307-3314.
- [42] **Stanczyk, K., Howaniec, N., Smolinski, A., Swiadrowski, J., Kapusta, K., Wiatowski, M., Grabowski, J. ve Rogut, J.** (2011). Gasification Of Lignite And Hard Coal With Air And Oxygen Enriched Air In A Pilot Scale Ex-Situ Reactor For Underground Gasification. *Fuel*. Vol.90, pp. 1953-1962.
- [43] **Hongtao, L., Feng, C., Xia, P., Kai, Y. ve Shuqin, L.** (2010). Method of Oxygen-Enriched Two-Stage Underground Coal Gasification. *Mining Size and Technology*. Vol.21, pp. 191-196.
- [44] **Kacur, J., Durdan, M., Laciak, M. ve Flegner, P.** (2014). Impact Analysis Of The Oxidant In The Process Of Underground Coal Gasification. *Measurement*. Vol.51, pp 147-155.
- [45] **Żogala, A.** (2014). Critical Analysis of Underground Coal Gasification Models. Part I: Equilibrium Models – Literary Studies, *Journal of Sustainable Mining*, 13(1), 22–28.
- [46] **Żogala, A.** (2014) Critical Analysis of Underground Coal Gasification Models, Part II: Kinetic and Computational Fluid Dynamics Models, *Journal of Sustainable Mining*, 13(1), 29–37.
- [47] **Yang, Y. ve Liu, S.** (2003). Numerical Simulation on Heat and Mass Transfer in the Process of Underground Coal Gasification, *Numerical Heat*

Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology, 44:5, 537-557.

- [48] **Shirazi, A.S., Mmbaga, J.P., Hayes, G. ve Hayes, R.E.** (2011). Modelling Cavity Growth during Underground Coal Gasification, Excerpt from the Proceedings of the 2011 COMSOL Conference in Boston.
- [49] **Shirazi, A.S.** (2012). CFD Simulation of Underground Coal Gasification. University of Alberta, Department of Chemical and Materials Engineering, MSc Thesis.
- [50] **Biezen, E.N.J., Bruining, J. & Molenaar, J.** (1995). An Integrated 3D Model for Underground Coal Gasification. SPS Annual Technical Conference & Exhibition held in Dallas. U.S.A., 22-25 Ekim
- [51] **Biezen, E.N.J.** (1996). *Modelling Underground Coal Gasification*. Delft University of Technology, Doktora Tezi
- [52] **Daggupati, S., Mandapati R.N., Mahajani, S.M., Ganesh, A., Pal, A.K., Sharma R.K., & Aghalayam, P.** (2011). Compartment Modeling for Flow Characterization of Underground Coal Gasification Cavity, *Ind. Eng. Chem. Res.* **50**, 277–290.
- [53] **Janoszek, T., Laczny, J.M., Stanczyk K., Smolinski A. & Wiatowski, M.** (2013). Modelling Of Gas Flow In The Underground Coal Gasification Process And Its Interactions With The Rock Environment, *Journal of Sustainable Mining*, ISSN 2300-3960, Vol. 12, No. 2, pp. 8–20, (2013).
- [54] **Park, K.Y. ve Edgar, T.F.** (1987). Modelling of Early Cavity Growth for Underground Coal Gasification. *Ind. Eng. Chem. Res.* **26**, 237-246.
- [55] **Perkins, G. ve Sahajwalla, V.** (2007). Modeling Of Heat And Mass Transport Phenomena And Chemical Reaction In Underground Coal Gasification. *Trans ChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design*, 85(A3): 329–343.
- [56] **Seifi, M., Chen, Z. ve Abedi, J.** (2011). Numerical Simulation of Underground Coal Gasification Using the Crip Method, *The Canadian Journal of Chemical Engineering* **89**, p1528-1535.
- [57] **Seifi, M., Chen, Z. ve Abedi, J.** (2014). Reaction Rate Constants in Simulation of Underground Coal Gasification Using Porous Medium Approach.
- [58] **Shirsat, V.A.** (1989) Modelling of Cavity Growth in Underground Coal Gasification. MSc Thesis.

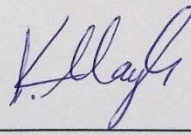
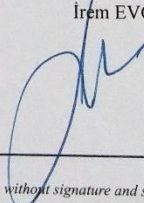
- [59] **Yang, L.** (2004). Study on the Model Experiment and Numerical Simulation for Underground Coal Gasification, *Fuel*, **83**, 573–584.
- [60] **Yang, L.** (2005). Nonlinear Coupling Mathematical Models on Percolation-Patterned Underground Coal Gasification, *Int. J. Energy Res.* 29:1331–1353.
- [61] **Roberts, D. G. ve Harris, D. J.** (2000). Char Gasification with O_2 , CO_2 and H_2O : Effects of Pressure on Intrinsic Reaction Kinetics. *Energy & Fuels*, **14**, 483-489.
- [62] **Patankar, S.V.** (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. ISBN: 0-07-048740-5
- [63] **Murthy, J.Y ve Mathur, S.R.** (1998). *Numerical Methods in Heat, Mass and Momentum Transfer, Draft Notes*.
- [64] **Chapra, C.S ve Canale, R.P.** (1988). *Numerical Methods for Engineers*. ISBN 978-0-07-340106-5
- [65] **Tunç, İ.** (2015). *Yarı Pilot Ölçek Yer Altı Kömür Gazlaştırma Deney Düzeneginde Malkara Pirinççeşme Kömür Sahasına Ait Blok Kömür Örneklerinin Gazlaştırılması*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.

EKLER

EK A: Tr12 Isıl Çiftinin Kalibrasyon Sertifikası

EK B: Matematik Model Kodunu İçeren CD

EK A

		TÜRKAK TÜRK AKREDITASYON KURUMU TURKISH ACCREDITATION AGENCY tarafından akredite edilmiştir.			
PENTA OTOMASYON ve Endüstriyel Ürünler San. Tic. Ltd. Şti.		Necatibey Cd. No:32 34425 Karaköy - İSTANBUL Tel: 0 212 243 63 47 (pbx) - Lab.Tel: 0 212 243 17 06 - Fax: 0 212 243 63 41 e-mail: info@pentaotomasyon.com.tr www.pentaotomasyon.com.tr		Kalibrasyon TS EN ISO/IEC 17025 AB-0113-K	
Kalibrasyon Sertifikası <i>Calibration Certificate</i>				AB-0113-K 150857S1865 04 - 15	
Cihazın Sahibi / Adresi <i>Customer / Address</i>	:	İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ GÜMÜŞSUYU KAMPÜSÜ MAKİNA FAKÜLTESİ MAKİNA FAKÜLTESİ GÜMÜŞSUYU KAMPÜSÜ 34437 GÜMÜŞSUYU / İSTANBUL			
İstek Numarası <i>Order Number</i>	:	150857			
Makine / Cihaz <i>Instrument / Device</i>	:	Göstergeli Sıcaklık Ölçer			
İmalatçı <i>Manufacturer</i>	:	Gösterge: Enda / Prob: -			
Tip / Model <i>Type / Model</i>	:	Gösterge: EOP41-101CTE-R2 / Prob: -			
Seri Numarası <i>Serial Number</i>	:	Gösterge: 060530010140100005 / Prob: T-12			
Kalibrasyon Tarihi <i>Date of Calibration</i>	:	09.04.2015			
Sertifikanın Sayfa Sayısı <i>Total Number of Pages</i>	:	3			
Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri gerçekleştiren ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler. This calibration certificate documents traceability to national standards, which realize unit of measurement according to the International System of Units (SI), Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarının tanınması konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ile Karşılıklı Tanınma Anlaşmasını imzalamıştır. The Turkish Accreditation Agency (TÜRKAK) is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for the Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation (ILAC) for the Mutual recognition of calibration certificates. Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir. Measurement results, expanded uncertainties and calibration methods are given on the following pages, which are part of this certificates.					
Mühür <i>Seal</i>	Tarih <i>Date</i>	Kalibrasyonu Yapan <i>Calibrated By</i>	Laboratuvar Müdürü <i>Head of Calibration Laboratory</i>		
	09.04.2015	Kıvanç MAYLI 	İrem EVÇİ 		
Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mührsüz sertifikalar geçersizdir. This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.					
FRS02-05		Rev.No: 05		Rev.Tarihi: 27.11.2014	

Şekil A.1: Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası, sayfa 1/3.

Makine / Cihaz / Instrument / Device

Cihazın Adı / Object	Göstergeli Sıcaklık Ölçer	İmalatçı / Manufacturer	Gösterge: Enda / Prob: -
Model / Model	Gösterge: EOP41-101CTE-R2 / Prob: -	Seri No / Serial No	Gösterge: 060530010140100005 / Prob: T-12
Yer / Place	Laboratuvar	Kabul Tarihi / Accept Date	-
Ölçme Aralığı / Range	0 °C ile 1200 °C	Çözünürlük / Resolution	0,1

Gelecek Kalibrasyon Tarihi / Due To : -

Prosedür ve Çevre Şartları / Procedure and Environmental Conditions

Cihazın kalibrasyonu, PRS01.03 dokümanına göre ve 20 °C (±3) ile 51 %RH (±15) çevre şartlarında yapılmıştır.

The calibration is performed according to PRS01.03 document while 20 °C (±3) and 51 %RH (±15)

Referans Cihazlar

Reference Devices

Cihazın Adı / Device	Cihaz Kodu/Seri No / Device ID/SN	Sertifika No/Tarih No/Date	İzlenebilirlik / Traceability
Referans Termometre	REF.S03 / 12016091	2014.2.0035 / 09-14	YÜKAL
Sıcaklık Nem Ölçer	REF.S08 / 12055620	2014S003 / 01-14	PENTA

Fiziksel ve Fonksiyonel Kontrol / Physical and Functional Control

Cihazın fiziksel ve fonksiyonel kontrolünde, ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek herhangi bir eksiklik ve hasar gözlenmemiştir.

No damage observed on the object that affects measurement results by physically and functionally control.

Metot / Method

Ölçümler, Blok Kalibratör ve Referans Termometre kullanarak; referans ve test cihazının kararlı hale gelmesinden sonra alınmıştır.

Kalibrasyon karşılaştırma esasına göre yapılmıştır. / Measurements are performed using Block Calibrator and Reference Thermometer after stabilization of both devices. Calibration based on comparison method.

Ölçüm Sonuçları ve Ölçüm Belirsizliği / Measurement Results and Measurement Uncertainties

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği; standart belirsizliğin k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucunda bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır. / The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

	Referans Sıcaklık Değeri °C Reference Temperature	Test Termometre Değeri °C Test Temperature	Hata °C Error	Ölçüm Belirsizliği °C Measurement Uncertainty
1	50,8	50,0	-0,8	0,22
2*	200,7	200,0	-0,7	0,34
3	391,8	400,0	8,2	3,25
4	582,2	600,0	17,8	3,44
5	688,8	700,0	11,2	3,44
6	787,4	800,0	12,6	3,44

Açıklama / Notes

" * " ile işaretli olan parametre akreditasyon kapsamı dışındadır.

Şekil A.2: Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası, sayfa 2/3.

Makine / Cihaz / Instrument / Device

Cihazın Adı / Object	Göstergeli Sıcaklık Ölçer	İmalatçısı / Manufacturer	Gösterge: Enda / Prob: -
Model / Model	Gösterge: EOP41-101CTE-R2 / Prob: -	Seri No / Serial No	Gösterge: 060530010140100005 / Prob: T-12
Yer / Place	Laboratuvar	Kabul Tarihi / Accept Date	-
Ölçme Aralığı / Range	0 °C ile 1200 °C	Çözünürlük / Resolution	0,1

Gelecek Kalibrasyon Tarihi / Due To : -

Prosedür ve Çevre Şartları / Procedure and Environmental Conditions

Cihazın kalibrasyonu, PRS01.03 dokümanına göre ve 20 °C (±3) ile 51 %RH (±15) çevre şartlarında yapılmıştır.

The calibration is performed according to PRS01.03 document while 20 °C (±3) and 51 %RH (±15)

Referans Cihazlar

Reference Devices

Cihazın Adı / Device	Cihaz Kodu/Seri No / Device ID/SN	Sertifika No/Tarih No/Date	İzlenebilirlik / Traceability
Referans Termometre	REF.S03 / 12016091	2014.2.0035 / 09-14	YÜKAL
Sıcaklık Nem Ölçer	REF.S08 / 12055620	2014S003 / 01-14	PENTA

Fiziksel ve Fonksiyonel Kontrol / Physical and Functional Control

Cihazın fiziksel ve fonksiyonel kontrolünde, ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek herhangi bir eksiklik ve hasar gözlenmemiştir.

No damage observed on the object that affects measurement results by physically and functionally control.

Metot / Method

Ölçümler, Blok Kalibratör ve Referans Termometre kullanarak; referans ve test cihazının kararlı hale gelmesinden sonra alınmıştır.

Kalibrasyon karşılaştırma esasına göre yapılmıştır. / Measurements are performed using Block Calibrator and Reference Thermometer after stabilization of both devices. Calibration based on comparison method.

Ölçüm Sonuçları ve Ölçüm Belirsizliği / Measurement Results and Measurement Uncertainties

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği; standart belirsizliğin k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucunda bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır. / The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

	Referans Sıcaklık Değeri °C Reference Temperature	Test Termometre Değeri °C Test Temperature	Hata °C Error	Ölçüm Belirsizliği °C Measurement Uncertainty
7	885,5	900,0	14,5	3,44
8	985,4	1000,0	14,6	3,95
9	1202,6	1200,0	-2,6	3,95

Açıklama / Notes

Şekil A.3: Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası, sayfa 3/3.

EK B

Çalışmada kurgulanan matematik modelin MATLAB dilinde yazılmış olan bilgisayar kodu, tezin arka kapağında eklidir.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Ahmet YILDIZ

Doğum Yeri ve Tarihi : İzmir, 13.07.1990

E-Posta : u.ahmetyildiz@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

- **Lise** : 2008, İzmir Bornova Anadolu Lisesi
- **Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği, Isı-Akışkan Programı